

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis

Nataly Souza Silva

**EFEITO DA MISTURA ALTERNATIVA DIESEL-BIODIESEL COMERCIAIS/H₂
NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO TIPO DIESEL: TESTES EM
BANCADA DINAMOMÉTRICA**

Diamantina

2018

Nataly Souza Silva

**EFEITO DA MISTURA ALTERNATIVA DIESEL-BIODIESEL COMERCIAIS/H₂
NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO TIPO DIESEL: TESTES EM
BANCADA DINAMOMÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Alexandre Alves de Melo

Diamantina

2018

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586e	<p>Silva, Nataly Souza</p> <p>Efeito da mistura alternativa diesel-biodiesel comerciais/H2 nos motores de combustão interna do tipo diesel: testes em bancada dinamométrica / Nataly Souza Silva, 2018.</p> <p>97 p. : il.</p> <p>Orientador: Rogério Alexandre Alves de Melo</p> <p>Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.</p> <p>1. Diesel. 2. Biodiesel. 3. Hidrogênio. 4. Motores. 5. Bancada dinamométrica. I. Melo, Rogério Alexandre Alves de. II. Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.</p> <p style="text-align: right;">CDD 662</p>
-------	--

Ficha Catalográfica – Serviço de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecária Nádia Santos Barbosa, CRB-6/3468

NATALY SOUZA SILVA

**EFEITO DA MISTURA ALTERNATIVA DIESEL-BIODIESEL
COMERCIAIS/H₂ NOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO TIPO
DIESEL: TESTES EM BANCADA DINAMOMÉTRICA**


Dissertação apresentada ao
MESTRADO EM BIOCOMBUSTÍVEIS,
nível de MESTRADO como parte dos
requisitos para obtenção do título de
MAGISTER SCIENTIAE EM
BIOCOMBUSTÍVEIS

Orientador (a): Prof. Dr. Rogério
Alexandre Alves De Melo

Data da aprovação : 21/09/2018



Prof.Dr. ROGÉRIO ALEXANDRE ALVES DE MELO - UFVJM



Prof.Dr. SANDRO LUIZ BARBOSA DOS SANTOS - UFVJM



Prof.Dr. VITORIO DELOGO DE CASTRO - UNIBH



Prof.Dr. JOSÉ IZAQUIEL SANTOS DA SILVA - UFVJM

DIAMANTINA

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por sempre iluminar os meus caminhos, me abençoar e por colocar tantos anjos em minha vida que foram muito importantes para a concretização desta conquista!

À minha família, pais (Jair e Suely) e irmãos (Natany e Alvaro) por todo carinho, compreensão, confiança e apoio. Ao meu anjinho Sophia, minha sobrinha, por me transmitir tanta paz e amor nos momentos difíceis.

Ao meu namorado Felipe, pelo companheirismo, apoio, incentivo, por estar ao meu lado sempre e em todos os momentos, e por acreditar tanto em mim!

Ao meu orientador, Prof. Rogério Melo, por toda confiança depositada em mim para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos técnicos da UFVJM Vinícius e Lindomar por me auxiliarem na realização de etapas cruciais para o fechamento deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis pelo apoio pedagógico e também aos membros que participaram da banca de qualificação e defesa pelas opiniões e conhecimentos transmitidos. Agradeço também aos diversos pesquisadores e alunos que auxiliaram nas caracterizações realizadas.

Um agradecimento especial aos meus amigos e companheiros de mestrado, Ângelo, Pâmela e Joyce, que estiveram ao meu lado diretamente nesta caminhada! Saibam que o apoio e companheirismo de vocês foram muito importantes para o meu fortalecimento pessoal e para a conclusão deste trabalho.

Enfim, gostaria de agradecer a todos aqueles que estiveram diretamente e indiretamente ao meu lado, que torceram, apoiaram e rezaram para que tudo ocorresse da melhor maneira possível e para que eu conseguisse realizar mais essa etapa em minha vida! Meu sincero muito obrigada!

RESUMO

O biodiesel tem se apresentado como uma excelente opção de combustível alternativo para ser usado em motores ciclo diesel, e, além dele, um outro combustível alvo de estudos para uso em motores de combustão interna é o hidrogênio. Visando a utilização de maiores quantidades de combustíveis provenientes de fontes renováveis de energia e obtenção de um combustível com maior poder detonante/calorífico e de alta eficiência em motores de combustão interna, este trabalho visou o teste em bancada dinamométrica de uma nova mistura de combustíveis formulada por meio da dissolução de gás hidrogênio em combustíveis comerciais diesel S10 e biodiesel B100 e seus respectivos *blends* nas proporções B20, B40 e B80. Foram avaliados o desempenho destas amostras combustíveis em termos de potência e torque a partir de diferentes rotações do motor e também de diferentes cargas. Inicialmente, os testes foram realizados com amostras de combustíveis sem a presença de hidrogênio para a promoção de posterior comparação de efeitos da presença deste gás nas amostras. Os resultados dos testes em bancada dinamométrica com as amostras de combustíveis mostraram que houve influência positiva da adição de gás hidrogênio nas amostras devido a um melhor desempenho observado em relação a valores de rotação, torque e potência alcançados pelos combustíveis nos motores. No primeiro teste em que utilizou-se o dinamômetro, as amostras de combustíveis que obtiveram um melhor desempenho geral foram as de diesel S10 e B20 com adição de H₂. No segundo teste, avaliando-se potência e torque frente a variados valores de rotação, a amostra que obteve um melhor desempenho foi o *blend* B20/H₂ (combustível com dissolução por gás hidrogênio), pois o mesmo alcançou o maior valor de torque e potência durante a maioria das faixas de rotação analisadas quando comparado a todas as outras amostras combustíveis.

Palavras chave: Diesel. Biodiesel. Hidrogênio. Motores. Bancada dinamométrica.

ABSTRACT

Biodiesel has been presented as an excellent alternative fuel option to be used in diesel cycle engines, and in addition to it, another study target fuel for use in internal combustion engines is hydrogen. Aiming at the use of larger quantities of fuels from renewable sources of energy and obtaining a fuel with higher detonating/calorific power and high efficiency in internal combustion engines, this work aimed at the dynamometric bench test of a new formulated fuel mixture by dissolving hydrogen gas in commercial diesel fuels S10 and biodiesel B100 and their respective blends in the proportions B20, B40 and B80. The performance of these fuel samples in terms of power and torque were evaluated from different engine speeds and also from different loads. Initially, the tests were performed with samples of fuels without the presence of hydrogen for the promotion of later comparison of effects of the presence of this gas in the samples. The results of the dynamometric bench tests with the fuel samples showed that there was a positive influence of the addition of hydrogen gas in the samples due to a better performance observed in relation to the values of rotation, torque and power reached by the fuels in the engines. In the first test in which the dynamometer was used, the samples of fuels that obtained a better general performance were those of diesel S10 and B20 with addition of H₂. In the second test, power and torque were evaluated against different values of rotation and the sample that obtained the best performance was the B20 / H₂ blend (fuel with dissolution by hydrogen gas), as it achieved the highest value of torque and power during most of the rotational ranges analyzed when compared to all other fuel samples.

Keywords: Diesel. Biodiesel. Hydrogen. Engines. Dynamometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Motor diesel, 4 tempos	26
Figura 2- Distribuição do consumo de combustíveis pela matriz veicular brasileira, ano base 2015	29
Figura 3- Representação da reação de transesterificação para obtenção de biodiesel.....	31
Figura 4 - Princípio do freio dinamométrico	37
Figura 5 - Amostras de combustíveis preparadas	42
Figura 6 - Picnômetro utilizado para determinação da massa específica a 20°C	43
Figura 7 - Viscosímetro utilizado para determinação da viscosidade dinâmica.....	44
Figura 8 - Dispositivo utilizado para a dissolução das amostras combustíveis.....	45
Figura 9 - Reator eletroquímico utilizado para a produção de hidrogênio.....	46
Figura 10 - Fluxômetro utilizado para quantificação de gás hidrogênio	47
Figura 11 - Amostras de combustíveis com adição de gás hidrogênio	47
Figura 12 - Bancada dinamométrica utilizada no teste de combustíveis líquidos.....	49
Figura 13 - Potenciômetro utilizado para variação de cargas.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Espectro de infravermelho dos combustíveis Diesel S10, B20, B40, B80 e B100.	55
Gráfico 2 - Espectro de infravermelho dos combustíveis Diesel S10/H ₂ , B20/H ₂ , B40/H ₂ , B80/H ₂ e B100/H ₂	56
Gráfico 3 - Curvas de rotação para as amostras combustíveis, teste com variação de cargas .	59
Gráfico 4 - Curvas de rotação para as amostras combustíveis com adição de H ₂ , teste com variação de cargas.....	60
Gráfico 5 - Curvas de torque para as amostras combustíveis, teste com variação de cargas ...	62
Gráfico 6 - Curvas de torque para as amostras combustíveis com adição de H ₂ , teste com variação de cargas.....	64
Gráfico 7 - Curvas de potência para as amostras combustíveis, teste com variação de cargas.	66
Gráfico 8 - Curvas de potência para as amostras combustíveis com adição de H ₂ , teste com variação de cargas.....	68
Gráfico 9 - Curvas de torque para as amostras combustíveis, teste com variação na rotação .	71
Gráfico 10 - Curvas de torque para as amostras combustíveis com adição de H ₂ , teste com variação na rotação	73
Gráfico 11 - Curvas de torque para as amostras combustíveis que obtiveram melhor desempenho com adição de H ₂ em comparação com as mesmas amostras sem adição de H ₂ , teste com variação na rotação	74
Gráfico 12 - Curvas de potência para as amostras combustíveis, teste com variação na rotação	76
Gráfico 13 - Curvas de potência para as amostras combustíveis com adição de H ₂ , teste com variação na rotação	78
Gráfico 14 - Curvas de potência para as amostras combustíveis que obtiveram melhor desempenho com adição de H ₂ em comparação com as mesmas amostras sem adição de H ₂ , teste com variação na rotação	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificação brasileira para o diesel S10 segundo ANP 50/2013	39
Tabela 2 - Informações do biodiesel utilizado nos testes	41
Tabela 3 - <i>Blends</i> das amostras utilizadas nos testes em bancada dinamométrica.....	42
Tabela 4 - Características técnicas do motor ciclo diesel.....	48
Tabela 5 - Características técnicas do dinamômetro elétrico	49
Tabela 6 - Dados relativos de Massa específica a 20°C e Viscosidade Cinemática a 40°C para as amostras estudadas	53
Tabela 7 - Faixa de absorção dos grupos funcionais presentes nas amostras combustíveis	54
Tabela 8 - Síntese da análise de variância dos valores médios de rotação (rpm) para as dez proporções de combustíveis analisadas e cargas	58
Tabela 9 - Síntese da análise de variância dos valores médios de torque (N.m) para as dez proporções de combustíveis utilizadas e cargas	61
Tabela 10 - Síntese da análise de variância dos valores médios de potência (kW) para as dez proporções de combustíveis utilizadas e cargas	65
Tabela 11 - Síntese da análise de variância dos valores médios de torque (N.m) segundo variadas rotações para as dez proporções de combustíveis utilizadas.....	69
Tabela 12 - Síntese da análise de variância dos valores médios de potência (kW) segundo variadas rotações para as dez proporções de combustíveis utilizadas.....	75

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
B0 a B100	Proporção cujo numeral indica o percentual em volume de Biodiesel
°C	Graus Celsius
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
<i>F</i>	Força
H ₂	Gás hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos
K	Kelvin
kW	Quilo-Watts
μ	Viscosidade dinâmica
MCI	Motores de combustão interna
<i>N</i>	Rotação
N.m	Newton-metro
NO _x	Óxido de nitrogênio
<i>P</i>	Potência
ρ	Massa específica
PCI	Poder calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PWM	Modulação por largura de pulso
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
rpm	Rotações por minuto
<i>T</i>	Torque
TDP	Tomada de potência
v	Estiramento
δ	Deformação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo Geral.....	23
2.2 Objetivos Específicos	23
3. REFERENCIAL TEÓRICO	25
3.1 Motor a Combustão Interna	25
3.1.1 Motor Ciclo Diesel	26
3.2 Características e propriedades dos combustíveis.....	27
3.2.1 Massa específica.....	27
3.2.2 Viscosidade	28
3.2.3 Poder calorífico	28
3.3 Combustíveis utilizados em motor ciclo diesel	29
3.3.1 Desempenho de diesel/biodiesel em motor de combustão interna.....	32
3.4 Hidrogênio	33
3.4.1 Utilização do hidrogênio em motores de combustão interna	33
3.5 Bancada Dinamométrica	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 Preparação das amostras de combustíveis	41
4.2 Caracterização das amostras combustíveis	42
4.2.1 Massa específica a 20°C	42
4.2.2 Viscosidade Cinemática a 40°C	44
4.3 Dissolução das amostras combustíveis com gás hidrogênio	45
4.4 Espectroscopia de Infravermelho.....	47
4.5 Testes em bancada dinamométrica.....	48
4.5.1 Local de realização do experimento.....	48
4.5.2 Composição da bancada dinamométrica	48
4.5.3 Testes na bancada com as amostras combustíveis	50
4.6 Delineamento experimental	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 Caracterização das amostras	53
5.1.1 Massa específica e viscosidade cinemática	53
5.2.2 Espectroscopia na região do infravermelho	54
5.2 Desempenho das amostras no motor de combustão interna	56
5.2.1 Teste de variação de cargas	56
5.2.2 Teste de variação de rotação	68

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
7. ATIVIDADES FUTURAS.....	83
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia que possam complementar ou substituir completamente o uso dos combustíveis fósseis tem sido cada vez mais incentivada devido principalmente a uma maior preocupação com questões relacionadas ao meio ambiente aliado às crescentes variações dos preços do petróleo (GUEDES, 2017).

O desenvolvimento de pesquisas para a utilização de biocombustíveis é impulsionado pela crescente demanda de energia vinculada à modernização industrial e também devido a uma elevada preocupação ambiental estimulada pelo aquecimento global e desequilíbrios climáticos (VANZELA *et al.*, 2017; MOFIJUR *et al.*, 2015; NAINWAL *et al.*, 2015).

O biodiesel é um dos principais biocombustíveis estudados atualmente (GIRARDI *et al.*, 2017). A Lei 11.097/2005, que possibilitou a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, define o biodiesel como um biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente os combustíveis de origem fóssil.

Este biocombustível é proveniente da reação denominada de transesterificação em que se utilizam como matéria-prima óleos vegetais ou gorduras animais, e por apresentar benefícios como não ser tóxico, não conter compostos aromáticos, não ser surfactante, ser biodegradável, gerar menor emissão de poluentes e apresentar boa lubrificação, vêm se tornando cada vez mais um possível substituto para o diesel de petróleo (KANAVELI; ATZEMI; LOIS, 2017; WU *et al.*, 2016; NAINWAL *et al.*, 2015).

Apesar das inúmeras vantagens do biodiesel, existem também algumas desvantagens que restringem sua ampla aplicação. Uma destas desvantagens é referente a suas propriedades combustíveis como a de poder calorífico. O poder calorífico do biodiesel é menor que a do diesel puro e isto pode ocasionar uma diminuição da performance do biocombustível nos motores de combustão interna (TINPRABATH *et al.*, 2015).

Relata-se também sobre a baixa durabilidade dos motores quando se utiliza o biodiesel, e este problema pode muitas vezes estar associado ao entupimento deste combustível nos motores (SHARMA; MURUGAN, 2017; CORACH; SORICHETTI; ROMANO, 2016). A maior viscosidade e a menor volatilidade do biodiesel minimizam os processos de pulverização de combustível, atomização e formação de mistura, o que resulta em queima mais lenta e uma maior duração do processo de combustão (RASLAVICIUS; BAZARAS, 2010).

Estudos estão sendo realizados a fim de promover uma melhora das propriedades combustíveis do biodiesel e para isto, geralmente, utilizam-se misturas do biodiesel comumente com diesel, álcoois e outros biodieseis, de modo que este processo possa, de alguma forma, melhorar as características combustíveis e físico-químicas dos biodieseis (CARVALHO *et al.*, 2013; WOO *et al.*, 2016; LAPUERTA *et al.*, 2017; VANZELLA *et al.*, 2017).

Além do biodiesel, o gás hidrogênio (H_2) têm sido considerado um combustível promissor para substituição dos combustíveis fósseis a médio e longo prazo devido principalmente possuir alto conteúdo energético por unidade de massa quando comparado aos demais combustíveis. Além de ser um recurso de energia renovável, o H_2 não contribui para o aumento do efeito estufa e isso se deve ao fato de que, ao entrar em combustão, o H_2 produz somente água, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica por células de combustível ou em motores a combustão interna (MOMIRLAN; VEZIROGIU, 2013).

O hidrogênio, por possuir principalmente a característica de alto poder calorífico, é estudado como uma solução promissora para melhorar os processos de combustão e desempenho em motores a combustão interna (CUNHA, 2017).

O atual trabalho de pesquisa consistiu inicialmente na produção e caracterização de amostras a partir da mistura entre os combustíveis comerciais diesel S10 e biodiesel B100 nas proporções (v/v) denominadas de B20 (20 % de biodiesel e 80 % de diesel), B40 (40 % de biodiesel e 60 % de diesel) e B80 (80 % de biodiesel e 20 % de diesel). Posteriormente houve a dissolução por gás hidrogênio (em temperatura e pressão ambiente) nos combustíveis comerciais e nos *blends* preparados. Estas amostras foram submetidas a testes em bancada dinamométrica para avaliação do efeito da presença do H_2 em relação ao desempenho em motores.

O teste das misturas em uma bancada dinamométrica é de fundamental importância. Por meio dele é possível avaliar a eficiência do combustível baseado em valores obtidos em relação à potência e torque do motor frente ao combustível inicialmente utilizado (KICH, 2011).

O uso de percentuais de hidrogênio na fase líquida de diesel e/ou biodiesel poderá garantir um melhor desempenho do motor quando comparado somente a utilização da mistura diesel/biodiesel, visto que problemas como queda de desempenho e elevação do consumo de combustível nos motores de combustão interna são relatados ao se utilizar grandes quantidades de biodiesel ao diesel de petróleo (ALDHAIHAWI *et al.*, 2017).

É necessário a descoberta de meios que façam com que o biodiesel seja cada vez mais eficiente, principalmente em relação a termos energéticos para que o mesmo possa ser utilizado em quantidades cada vez maiores nos motores a combustão interna.

Diante deste cenário, o estudo se justifica pela necessidade da promoção de meios que comprovem a eficiência de biodiesel em níveis crescentes em motores de combustão interna (visto que o incentivo ao seu uso está sendo cada vez mais intensificado), seja o mesmo usado de forma única ou associado a outros combustíveis, como neste caso associado ao diesel e ao gás hidrogênio. Sendo assim, a validação do uso de percentuais cada vez maiores de biodiesel no diesel é fundamental para subsidiar decisões referentes à ampliação do uso de biodiesel tanto no Brasil como em vários países do mundo.

O uso alternativo de misturas combustíveis com o biodiesel vem sendo estudada como forma de promover um melhor desempenho relacionado à eficiência energética em motores de combustão interna além de trazer uma opção ambientalmente viável para o setor de combustíveis em que atualmente predomina-se a utilização de combustíveis fósseis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Formular e testar uma nova mistura combustível por meio da dissolução de gás hidrogênio em *blends* de diesel/biodiesel comerciais e biodiesel puro, visando obter um combustível com maior poder detonante, calorífico e de alta eficiência em motores de combustão interna.

2.2 Objetivos Específicos

- Preparar amostras de combustíveis do tipo: B20, B40 e B80 a partir dos combustíveis comerciais diesel S10 (contendo 10% de biodiesel) e do biodiesel B100;
- Caracterizar as amostras de combustíveis preparadas através de análises de massa específica a 20°C, viscosidade cinemática a 40°C e espectroscopia de infravermelho;
- Testar em bancada dinamométrica as amostras de combustíveis preparadas e também o diesel S10 e biodiesel B100;
- Promover a dissolução de gás hidrogênio em todas as amostras de combustíveis (diesel S10, B20, B40, B80 e B100);
- Testar em bancada dinamométrica as amostras de combustíveis que passaram por dissolução por gás hidrogênio;
- Avaliar e comparar o desempenho em bancada dinamométrica das amostras combustíveis sem e com a presença de H₂.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Motor a Combustão Interna

Pode-se dizer que o motor de combustão interna foi uma das invenções que mais ocasionaram impactos na sociedade, na economia mundial e também no meio ambiente. Vários pesquisadores foram responsáveis por desenvolver os motores de combustão interna ao longo do tempo, mas foi Nicolaus Otto que em 1876 apresentou um inovador motor de ignição por centelha, e Rudolf Diesel, em 1892, que apresentou ao mundo o primeiro motor funcional de ignição por compressão. Ambos foram responsáveis por popularizar os motores de combustão interna ao redor do mundo com a praticidade e funcionalidade de suas criações, sendo estes motores usados há muito tempo principalmente pela indústria automotiva (ALAGUMALAI, 2014).

O motor de combustão interna é uma máquina térmica, ou seja, é uma máquina que utiliza a energia obtida em forma de calor para gerar trabalho. Nos motores de combustão interna, o calor necessário para gerar trabalho é obtido por meio da queima de combustíveis que ocorre dentro das câmaras de combustão do motor. Desta maneira, o fluido combustível ativo na presença de ar participa diretamente da combustão (BRUNETTI, 2012).

Baseado nos estudos do francês *Nicolas Léonard Sadi Carnot*, físico e desenvolvedor dos fundamentos da segunda Lei da Termodinâmica, os motores de combustão interna não são 100 % eficientes. Algumas razões para isso ocorrem devido ao fluido de trabalho não conseguir completar um ciclo, pois, a mistura de admissão se transformará em gases de escape e será liberada para a atmosfera; não haver troca de calor entre dois reservatórios térmicos; e a eficiência máxima do motor nem sempre coincidir com a alta temperatura gerada pelo sistema (SEIFFERT; BRAESS, 2005).

Desde o seu período de criação até os dias atuais, as máquinas térmicas sofreram profundas mudanças operacionais e estruturais, acompanhando o desenvolvimento da tecnologia nas áreas de materiais, processos de fabricação mecânica, tecnologia eletroeletrônica, entre outras que se aplicam. O rendimento térmico na época de sua invenção não superava os 10 %, hoje chega a 40 % em alguns motores de ciclo diesel modernos (WILLARD, 2004).

Apesar do rendimento aparentemente baixo, a justificativa do uso das máquinas térmicas está baseada na autonomia de deslocamento que ela propicia, pois grandes descobertas humanas, viagens e movimentação de materiais foram e ainda são realizadas com propulsão de motores de combustão interna (ROSA, 2014).

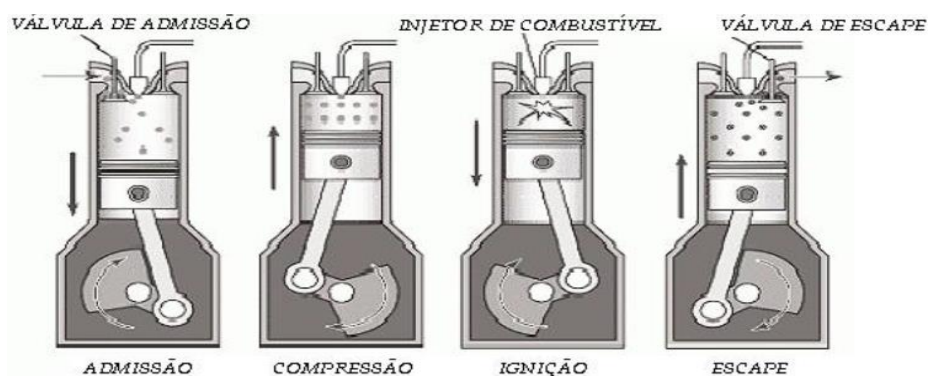
3.1.1 Motor Ciclo Diesel

O nome motor diesel é uma homenagem ao seu inventor *Rudolf Christian Karl Diesel*, cuja obtenção de patente ocorreu em 1897. Esses motores funcionam por meio do princípio de ignição por compressão e podem operar com diversos combustíveis além do combustível diesel, como por exemplo, óleo combustível, querosene ou biodiesel (NUNES, 2017).

Os motores diesel podem operar em ciclo de 2 ou 4 tempos. Os motores em ciclo de 2 tempos são utilizados principalmente em grandes aplicações, como em motores navais e de instalações geradoras e se caracterizam como motores de baixa rotação, já os motores em ciclo de 4 tempos são os tipos mais comumente usados em veículos (PODORODECZKI, 2016).

A Figura 1 ilustra o comportamento de um motor diesel de ciclo de 4 tempos, apresentando o processo de admissão, compressão, ignição/expansão e escape/exaustão.

Figura 1- Motor diesel, 4 tempos



Fonte: EIT, 2016.

Segundo Bosch (2005), o motor de ciclo diesel 4 tempos possui itens básicos de um motor alternativo (que alterna o movimento), constituídos por um conjunto cilindro - êmbolo, responsável pela compressão do ar e também para impulsionar o conjunto biela-manivela, e este último conjunto é responsável pela transmissão de movimento a um volante de massa. O funcionamento básico é realizado em 4 etapas de acordo com o movimento do pistão e do eixo de manivelas.

Ocorre inicialmente a admissão, nesta etapa, a válvula de admissão se abre e o pistão se desloca do ponto morto superior para o ponto morto inferior, assim ocorre a entrada do ar na câmara de combustão devido à queda de pressão gerada pelo movimento descendente do pistão. Após essa etapa, as válvulas, tanto de entrada de ar como de escape são fechadas e começa o tempo de compressão. Na etapa de compressão, ocorre o movimento de subida do

êmbolo em direção ao ponto morto superior comprimindo o ar admitido no tempo anterior. Ao chegar ao ponto morto superior ocorre a injeção de combustível na câmara, onde então a mistura ar combustível é formada e é inflamada pela alta temperatura, entre 700 e 900°C. Esse processo promove a geração de pressão interna no sistema, fazendo com que o êmbolo seja empurrado até o ponto morto inferior devido à expansão dos gases queimados. Finalmente, na fase de escape, ocorre a abertura da válvula de escape e expulsão dos gases queimados para novamente iniciar o ciclo produzindo outra vez o que chamamos de trabalho (BOSCH, 2005).

3.2 Características e propriedades dos combustíveis

Para que haja o funcionamento de um motor com determinado tipo de combustível, é necessário que este possua algumas propriedades singulares que garantam um apropriado desempenho que muitas vezes está relacionado ao torque e potência que os combustíveis podem proporcionar quando empregados em motor de combustão interna. As propriedades que o biodiesel deve apresentar para poder operar adequadamente em um motor de ciclo diesel são semelhantes às do diesel de petróleo. Algumas propriedades como massa específica, viscosidade cinemática e poder calorífico estão diretamente relacionadas ao consumo e a performance dos motores, sendo assim análises de grande importância para a avaliação do combustível empregado (BAMBRILA, 2006).

3.2.1 Massa específica

A massa específica de um combustível é definida como a massa por unidade de volume, sendo medida a uma certa temperatura e pressão. Existe uma relação constante entre o poder calorífico e a massa específica; massas específicas mais altas possuem poder calorífico mais alto, devido à composição do combustível, porém podem causar tanto aumento de potência quanto aumento de emissão de fumaça (MARTINS, 2006). A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio de resoluções, determinou que os valores de medição de massa específica, ensaiados conforme a Norma Brasileira (NBR) 14065, estejam entre 815 e 850 kg/m³ para o diesel S10 e entre 850 e 900 kg/m³ para o biodiesel (ANP, 2013; ANP, 2014).

3.2.2 Viscosidade

A viscosidade é uma das mais importantes características de um combustível, pois esta propriedade afeta as condições de injeção dos sistemas especialmente em baixas temperaturas quando há baixa fluidez do combustível. Além disso, a viscosidade também influencia a capacidade de lubrificação, protegendo bombas de combustível e demais superfícies metálicas (BARABÁS *et al.*, 2010).

Existe a necessidade de imposição de limites superior e inferior de viscosidade do combustível utilizado em um motor para que o mesmo obtenha um adequado desempenho, pois viscosidades muito baixas podem ocasionar vazamento de combustível nos sistemas de injeção, formando gotas muito pequenas que acabam por aumentar a superfície de contato e facilitar a evaporação, enquanto viscosidades muito elevadas podem provocar atomização insuficiente e combustão incompleta, maior demanda de energia pela bomba de combustível e redução da fluidez em condições de baixas temperaturas do motor (frias) (SHAHIR *et al.*, 2014).

Os efeitos provocados pela alta viscosidade dificultam a mistura do ar com o combustível, acarretando a uma combustão incompleta, acompanhada de perda de potência e aumento do consumo de combustível (BOSCH, 2005).

3.2.3 Poder calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia química disponível e liberada por um combustível por unidade de massa na hora da combustão. Existem dois tipos de poder calorífico, o superior e o inferior (MARTINS, 2006).

O poder calorífico é calculado a partir da quantidade de calor liberada durante a combustão, considerando as temperaturas dos reagentes iguais as temperaturas dos produtos da combustão. A água, sendo um dos constituintes dos gases de escape, poderá aparecer sob a forma de vapor ou estado líquido. A quantidade de energia referente ao calor latente de vaporização da água nos dá a diferença entre o poder calorífico inferior (PCI) (vapor) e o poder calorífico superior (PCS) (água condensada). A diferença em valores entre os dois resume-se na quantidade de calor necessária para evaporar a água contida nos gases de exaustão (NEVES, 2012).

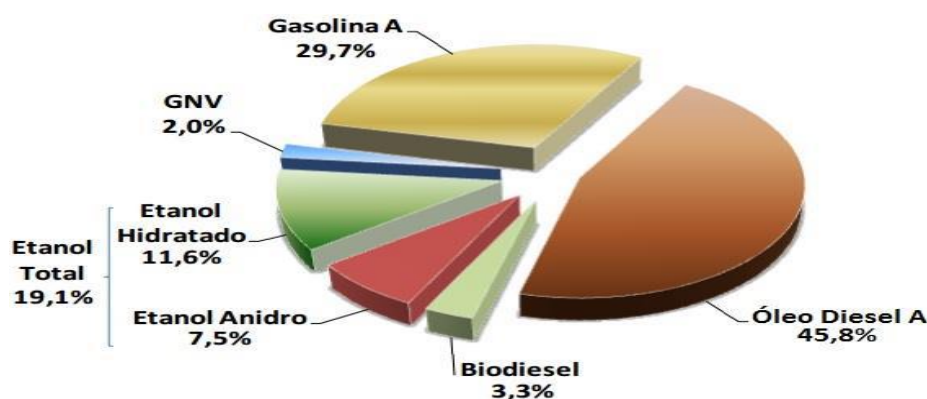
O consumo de um combustível que possui menor poder calorífico será maior. O poder calorífico do biodiesel é menor que o diesel fóssil e isso faz com que o motor tenha uma potência menor quando opera com percentuais elevados de biodiesel (TZIOURTZIOUMIS *et al.*, 2012).

3.3 Combustíveis utilizados em motor ciclo diesel

O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto, constituído basicamente por hidrocarbonetos. É um combustível de uso rodoviário e não rodoviário, destinado a veículos e equipamentos dotados de motores do ciclo diesel. A sua produção ocorre através de processos de refino de petróleo e também do processamento de gás natural (ANP, 2014).

Conforme a ANP (2016), o diesel ocupa uma parcela significativa da matriz veicular brasileira (Figura 2) e foi responsável, no ano de 2015, por praticamente metade (45,8 %) do consumo total de combustíveis. Associando isso ao fato de que o setor de transportes é o maior consumidor de combustíveis líquidos do país, logo, é possível inferir que grande parte dos meios de transporte é movida à diesel.

Figura 2- Distribuição do consumo de combustíveis pela matriz veicular brasileira, ano base 2015



Fonte: ANP, 2016.

De acordo com a ANP (2014), o óleo diesel está regulamentado através de seu teor de enxofre. Para venda e distribuição de uso rodoviário há regulamentação do diesel S500 e do S10, cuja sigla identifica a quantidade de enxofre em miligramas por quilograma (ppm de enxofre). O combustível diesel é um produto que possui pouca inflamabilidade, pouca volatilidade, média toxicidade, límpido, sendo isento de material em suspensão e com odor característico.

No Brasil, desde 2005, fomenta-se a inclusão gradativa de combustíveis alternativos ao óleo diesel, com ênfase aos derivados de óleos e gorduras vegetais e animais. Sendo assim, há no país a obrigatoriedade de adição de biodiesel ao diesel no teor estabelecido pela legislação vigente (ANP, 2014).

O biodiesel é definido quimicamente como um éster de ácido graxo, sendo obtido principalmente através de uma reação química denominada de transesterificação, mas também pode ser originado através de processos como craqueamento e esterificação (ANP, 2014).

A alternativa de se misturar combustíveis com o biodiesel vem sendo estudada como forma de melhorar a eficiência energética em motores e trazer uma opção ambientalmente viável para o setor de combustíveis que atualmente predomina-se o uso de combustíveis fósseis (BEATRIZ; ARAUJO; LIMA, 2011).

O biodiesel tem sido alvo de interesse para uso como um combustível alternativo em relação aos combustíveis fósseis em virtude de ser um combustível oxigenado e renovável, ser isento de enxofre e compostos aromáticos, ser atóxico e também biodegradável (SUBHASH; SUBRAMANIAN, 2015).

Acredita-se que as pesquisas para difundir ainda mais o uso do biodiesel como fonte de energia continuem sendo uma das principais tendências para o mercado energético nos próximos anos, pode-se dizer então que o biodiesel é considerado como um dos combustíveis alternativos mais promissores para o uso em motores de combustão interna com ciclo diesel (MILAZZO *et al.*, 2013).

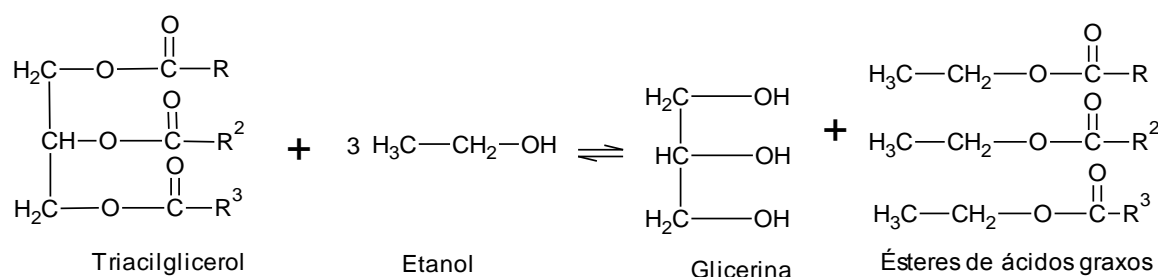
Rudolf Diesel, no início do século XX, sugeriu que seu motor diesel pudesse admitir não apenas os derivados do petróleo, mas também óleos vegetais. Esses últimos, porém, apresentam uma viscosidade aproximadamente dez vezes superior à do diesel de petróleo, o que leva a problemas como baixa atomização, combustão incompleta, formação de goma de resíduos de carbono quando de sua utilização em motores de combustão interna. Alguns métodos para reduzir a alta viscosidade de óleos vegetais foram descobertos, sendo a transesterificação a que tem se apresentado como a melhor opção, visto que o processo é simples e promove a obtenção de um combustível denominado biodiesel, cujas propriedades são semelhantes às do óleo diesel mineral (TAPANES *et al.*, 2013).

O processo de transesterificação consiste na reação de um éster com álcool de cadeia curta, etanol ou metanol, sendo a reação realizada na presença de um catalisador, promovendo a formação final de mono-alquil éster e glicerol (ou glicerina). Os tri-ésteres utilizados no processo provém principalmente de óleos vegetais ou gordura animal. Existem diversos óleos vegetais que servem de matéria-prima, tais como soja, coco, mamona, algodão, palmeira, canola, girassol, amendoim e outros; assim como também sebo bovino que representa uma matéria-prima de gordura animal. No Brasil, a soja é a principal fonte para a produção do biodiesel, seguida do sebo bovino (POUSA; SANTOS; SUAREZ, 2007).

Para que ocorra uma reação estequiométrica de transesterificação são necessários 3 moles de álcool para cada mol de triglicerídeos, formando então 3 moles de ésteres de ácidos graxos e 1 mol de glicerina residual (PINTO *et al.*, 2005).

A reação de transesterificação é reversível e, devido a isto, se utiliza um excesso de álcool para que ocorra a formação de produtos (DABDOUB; BRONZEL; RAMPIN, 2009). Na Figura 3 se apresenta o esquema de rotas da reação de transesterificação.

Figura 3- Representação da reação de transesterificação para obtenção de biodiesel



Fonte: LOBO; FERREIRA; CRUZ, 2009. Adaptado.

O biodiesel pode ser utilizado em motores de ignição por compressão em alternativa ao óleo diesel, substituindo-o integralmente ou parcialmente através de misturas. Nas misturas diesel/biodiesel a indicação da concentração do biocombustível é dada pela sigla “Bx”, na qual “x” anuncia a porcentagem volumétrica de biodiesel na mistura. Por exemplo, “B5” refere-se à uma mistura diesel/biodiesel em que há 5 % de biodiesel e 95 % de diesel puro em volume (ROMANO; SORICHETTI, 2011).

O Brasil é atualmente o segundo maior produtor e consumidor de biodiesel, atrás somente dos Estados Unidos, alcançando a produção de 3,8 bilhões de litros de biodiesel no Brasil em 2016 (DELGADO; EVANGELISTA; ROITMAN, 2017).

Por ser um país com matriz de transportes essencialmente rodoviária, as pesquisas por combustíveis alternativos no Brasil sempre foram importantes e colocaram o país em uma posição de vanguarda no cenário mundial em pesquisas relacionadas ao uso de biocombustíveis, visto que o óleo diesel sempre foi importado de outros países.

Em 2005, através da Lei 11.097, o biodiesel é implementado no Brasil como combustível, sendo a ANP o órgão responsável por estabelecer padrões de comercialização, distribuição, controle de qualidade e venda. Por meio dessa Lei foi fixada a porcentagem mínima de 2 % em volume de biodiesel a ser acrescentado ao óleo diesel, o chamado B2.

Em 2014, por meio da Lei 13.033, houve o incremento do percentual de biodiesel em mistura com o diesel, passando a ser de 6 % (B6). Em 2015, pela mesma Lei, o incremento

do percentual passou a ser de 7 % (B7). Em 23 de março de 2016, a Lei 13.263 alterou o percentual para 8 % (B8) em até doze meses após a data de promulgação desta Lei, 9 % (B9) em até 24 meses e 10 % (B10) em até 36 meses (BRASIL, 2005; 2014 e 2016).

Em dezembro de 2017, a Resolução de nº 23, antecipou a adição obrigatória de 10 %, sendo válida a partir de março de 2018. Ainda em 2017, por meio da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) que objetivou traçar uma estratégia conjunta para o reconhecimento do papel dos biocombustíveis na matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para mitigação de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa (BRASIL, 2017).

3.3.1 Desempenho de diesel/biodiesel em motor de combustão interna

Estudos mostram que não há perdas significativas no desempenho do motor quando operando com biodiesel ou misturas binárias, apresentando pouca redução na potência e no torque, e que a maior alteração ocorre em relação ao consumo de combustível, não havendo assim necessidades de alterações no motor. Testes já mostraram a viabilidade de operação de um motor ciclo diesel com biodiesel (B100) obtido do óleo de soja. Segundo Volpato *et al.* (2009), o biodiesel proveniente do óleo de soja apresenta menor consumo específico e energético (redução de 14,66 % na rotação de trabalho de 540 rpm) em relação ao diesel.

Testes realizados mundialmente, com várias formas de biodiesel, comprovam que há viabilidade técnica para o uso deste biocombustível em motores diesel. Acrescenta-se, no entanto, que qualquer alteração no combustível ou mesmo a adoção de combustíveis alternativos, diferentes do óleo diesel, possa exigir adaptações no motor. Porém, no caso de misturas de óleo diesel com biodiesel, não há necessidade de modificação do motor, sendo necessário somente que o biodiesel possua padrão de qualidade, podendo desta maneira ser utilizado nos motores de combustão interna (HOLANDA, 2004).

Uma avaliação do desempenho de um motor de ignição por compressão da marca CUMMINS, modelo 4BTA 3.9, funcionando com diferentes misturas de biodiesel (B2, B5, B10, B20, B50, B75 e B100) produzido a partir do álcool etílico e do óleo de soja, no diesel de petróleo, mostrou que as misturas combustíveis B2, B5 e B10 resultaram em desempenho semelhante ao do diesel (B0). Confrontando B0 e biodiesel puro (B100), observou-se que o motor apresentou desempenho inferior nos quesitos potência, torque e consumo específico, quando os autores utilizaram 100 % de biodiesel. A proporção B20 destacou-se, apresentando melhor desempenho que B0 (CASTELLANELLI *et al.*, 2008).

Barbosa *et al.* (2008), avaliando o desempenho de um motor alimentado com óleo diesel mineral e misturas deste com biodiesel nas proporções equivalentes a B2, B5, B20 e B100 concluíram que a potência do motor aumentava, respectivamente, do B100 ao diesel mineral; entretanto, na ordem inversa, havia a diminuição da eficiência térmica conforme aumentavam-se as misturas crescentes de biodiesel no diesel, sendo 4 % menor para o B100. Em relação ao consumo energético, este diminuía à medida que se aumentava a quantidade de biodiesel adicionada ao diesel mineral.

Estudos utilizando *blends* de diesel/biodiesel, em sua maioria, informaram que houve um aumento do consumo de combustível à medida que as frações de biodiesel na mistura aumentam. A explicação desses comportamentos pode ser devido ao fato de o biodiesel ter um menor valor de poder calorífico, maior densidade e viscosidade, que o combustível diesel puro (ILERI; KOCAR, 2014).

O conteúdo energético, representado pelo poder calorífico, é uma propriedade que demonstra a adequação dos vários tipos de compostos graxos para o uso como combustível diesel. O poder calorífico contido nos ésteres alquílicos é equivalente a aproximadamente 90 % do observado no diesel de petróleo (KNOTHE *et al.*, 2006).

3.4 Hidrogênio

3.4.1 Utilização do hidrogênio em motores de combustão interna

A busca pela crescente utilização de combustíveis provenientes de fontes energéticas sustentáveis é um grande desafio, pois estes não podem comprometer o desenvolvimento humano, visto que os biocombustíveis de maior ênfase são produzidos a partir de matérias-primas utilizadas na alimentação humana (SANTOS, 2017). Torna-se então necessária a utilização de matrizes vegetais que não afetem a alimentação humana, ou então a utilização de outras fontes de energia. A partir desse apelo, está sendo indicada uma nova forma de se utilizar um combustível gasoso, de abundância no planeta Terra e que não possui carbono em sua estrutura, neste caso o hidrogênio (SARAVANAN; NAGARAJAN, 2010).

O hidrogênio se encontra presente em cerca de 70 % da superfície terrestre, como constituinte de diversos compostos, como a água, que é um produto que não apresenta toxicidade e não polui o meio ambiente. A combustão do hidrogênio resulta na formação de água, e a sua obtenção ocorre a partir de vários processos com o uso de diferentes matérias-primas (SOUZA, 2009).

O gás hidrogênio pode ser obtido a partir de energia elétrica (via eletrólise da água), pelas fontes hidroelétricas, geotérmicas, eólica, solar fotovoltaica e por meio da eletricidade gerada pelas usinas nucleares. Pode ainda ser obtido da energia da biomassa (via reforma catalítica ou gaseificação, seguido de purificação), como etanol, lixo e rejeitos da agricultura (SALIBA; LINARDI, 2009).

O hidrogênio tem se tornado um substituinte promissor dos combustíveis fósseis por apresentar principalmente elevada energia específica e ausência de emissão de gases do efeito estufa, pois, o produto químico da combustão é somente água (CHINTALA; SUBRAMANIA, 2017). O valor de aquecimento do hidrogênio é aproximadamente três vezes maior que o do gasóleo e a presença do mesmo proporciona uma combustão mais efetiva (SARAVANAN *et al.*, 2007).

A temperatura de autoignição do hidrogênio corresponde a 858 K, ou seja, 585 °C (BARRETO; MAKIHIRA; RIAHI, 2003). Devido à sua alta temperatura de autoignição, torna-se inválida a utilização de somente hidrogênio na combustão em motores ciclo diesel. Para a utilização do hidrogênio em motores diesel é necessário o seu enriquecimento por meio da utilização de outros compostos que possuam grande inflamabilidade e poder de autoignição de menor temperatura (BUCKEL; CHANDRA, 1996).

Estudos de motores com *blends* de combustível diesel com hidrogênio apresentaram aproximadamente a mesma potência, rendimento térmico e eficiência dos motores testados com diesel (HARAGOPALA; SHRIVASTAVA; BHAKTA, 1983).

Estudos foram realizados a fim de se avaliar e verificar as emissões de um motor a diesel de tração quatro cilindros, quatro tempos, composto por sistema de injeção direta de 50 kW a 2400 rpm com amostra combustível contendo diesel/biodiesel na proporção de 20 % de biodiesel e 80 % de diesel (B20). Além disso, houve a adição de gás hidrogênio (adicionado ao fluxo de ar de admissão do motor ciclo diesel). A investigação foi realizada nas rotações entre 1400 rpm e 2400 rpm com 60 % de carga. Os resultados mostraram um aumento em até 7 % nas emissões de óxido de nitrogênio (NOx) em alta velocidade, um efeito semelhante também ocorre sobre o diesel de petróleo quando houve o enriquecimento deste combustível com hidrogênio. Em relação a emissões de fumaça e monóxido de carbono (CO), estas foram reduzidas por adição de hidrogênio no combustível B20 (CHIRIAC; APOSTOLESCU, 2013).

Com o mesmo objetivo, um estudo numérico foi conduzido em motor a diesel abastecido por biodiesel e enriquecido com hidrogênio (0, 5, 1, 2 e 3 % em volume) por meio do coletor de admissão de ar a diferentes velocidades e cargas do motor. Os resultados da simulação indicaram que em termos de combustão, observou-se um aumento geral para a

pressão máxima do cilindro e para a taxa de liberação de calor, já em relação ao atraso da ignição não houve nenhum efeito significativo. Em termos de emissões, a presença de hidrogênio provocou queda nas emissões de até 23,5 % de CO e fuligem nas condições operacionais testadas (AN *et al.*, 2014).

Baltacioglu *et al.* (2016), relataram que a utilização de biodiesel enriquecido com gás hidrogênio em motores de combustão interna resultaram em um torque eficaz, pequeno aumento de potência, diminuição do consumo de combustível, diminuição nas emissões de CO e dióxido de carbono (CO₂) e aumento na emissão de NO_x quando comparados com o desempenho provocado ao se utilizar somente do combustível diesel.

Existem três métodos estudados para adicionar hidrogênio em motores a diesel: 1. injeção contínua no coletor de admissão, 2. injeção controlada no coletor de admissão e 3. injeção diretamente na câmara de combustão (CHRISTODOULOU; MEGARITIS, 2013).

A injeção contínua de H₂ no coletor de admissão é o método mais simples, mas apresenta como desvantagem o potencial de risco de ocorrência de explosão. Por isso, o hidrogênio deve sempre passar através de uma válvula de proteção/segurança contra chama para se evitar uma possível explosão no sistema de fornecimento de hidrogênio (MORSY; EL-LEATHY; HEPBASLI, 2015).

A metodologia utilizando injeção controlada permite ajustar a quantidade e o tempo exato da injeção de H₂ no coletor de admissão, no entanto, é necessário um injetor calibrador de gás hidrogênio que sincroniza-se com a bomba de injeção de combustível. Ambos os métodos de injeção de hidrogênio citados acima levam a uma diminuição da eficiência volumétrica do motor, uma vez que o hidrogênio desloca parte do ar dentro do coletor de admissão (BATMAZ, 2013).

Em relação à injeção de gás hidrogênio na câmara de combustão do motor, não ocorre problemas relacionados à diminuição da eficiência volumétrica, no entanto, este método apresenta grandes dificuldades como o projeto do injetor de gás de alta pressão e a necessidade de modificação da estrutura do cilindro para introdução do gás no sistema (KOSE; CINIVIZ, 2013).

Em um estudo de injeção contínua de hidrogênio ao combustível B7, a fim de se verificar os efeitos desta mistura sobre o desempenho de um grupo gerador diesel e sua emissão, verificou-se uma redução no consumo específico de combustível e também na emissão de partículas (CO e hidrocarbonetos (HC)) para valores inferiores aos percentuais de redução quando comparados a utilização do combustível B7. Apresentou também redução nas emissões de CO₂ em relação ao B7. O aumento do teor de hidrogênio na mistura aumentou e antecipou

a pressão de pico no cilindro, aumentando também a temperatura média do gás dentro do cilindro, refletindo assim no aumento das emissões de NOx. Essa condição pode ser agravada com cargas mais altas do motor. Tudo isso indica que o hidrogênio promove uma combustão mais rápida com maiores taxas de liberação de calor (ROCHA *et al.*, 2017).

3.5 Bancada Dinamométrica

A humanidade sempre buscou formas de estimar forças atuantes em máquinas, mensurando seus esforços e eficiências, desde máquinas simples como alavancas, até máquinas complexas, como os motores de combustão interna. O dispositivo de medição de força é conhecido como dinamômetro e está baseado no princípio de proporcionalidade entre a força aplicada e a deformação do dispositivo chamado dinamômetro (MARTYR *et al.*, 2007).

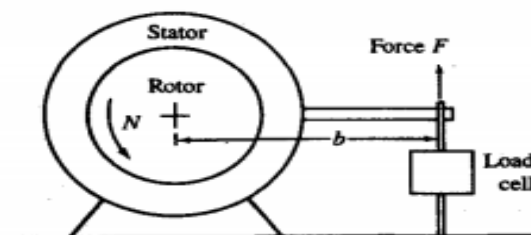
Com relação à aplicação dos combustíveis alternativos em motores diesel, deve-se pensar, entre outros aspectos, na manutenção do desempenho operacional. Para avaliação de desempenho, os motores de combustão interna devem ser submetidos a ensaios de plena carga, diretamente pelo volante do motor ou pela tomada de potência (TDP), no caso de tratores agrícolas. Para isso, o dinamômetro é o item mais importante num banco de provas de motores e é utilizado para medir a potência, o torque e o consumo específico de combustível de um motor, além de oferecer subsídios para determinação de demais variáveis (STONE, 1999).

O torque e a potência mecânica de um motor são representados por suas curvas características. Essas curvas exibem a variação do torque e da potência em função da velocidade de rotação e são geradas a partir de testes em dinamômetros mantendo a carga constante, isto é, com a borboleta completamente aberta. O ensaio permite a obtenção do torque resistente do dinamômetro, que corresponde ao torque do motor, e a potência é calculada a partir deste parâmetro (MARTINS, 2006).

Dinamômetro na indústria automotiva é o equipamento usado para determinar o torque e a potência dos motores usados em veículos. Existem diversas formas de dinamômetros, os quais são divididos em dinamômetro de freio e dinamômetro de inércia (MARTINS, 2013).

O freio de Prony, desenvolvido em 1821 pelo engenheiro francês Gaspard Prony, é o elemento didático empregado para compreender o funcionamento de um dinamômetro. O freio dinamômetro é um equipamento que tende a frear o eixo do motor por atrito mecânico, princípios hidráulicos ou eletromagnetismo. O estator do sistema é acoplado a um braço de comprimento “b”, o qual está conectado a uma célula de carga para que seja medida a força exercida pelo motor na extremidade do braço conforme Figura 4 (HEYWOOD, 1998):

Figura 4 - Princípio do freio dinamométrico



Fonte: Heywood, 1988.

Calcula-se o torque gerado pelo motor e entregue ao dinamômetro por meio da Equação 1 (KOLLROSS, 2016):

$$T = F.b \quad (1)$$

Sendo:

T = torque exercido pelo motor (N.m);

F = força medida pela célula de carga (N);

b = comprimento do braço (m).

Para determinar a potência que o motor entrega ao dinamômetro utiliza-se a Equação 2 (KOLLROSS, 2016):

$$P = \frac{2.\pi.N.T}{60000} \quad (2)$$

Em que:

P = potência do motor (kW);

N = rotação do motor (rpm);

T = torque (Nm).

A medição de torque e potência de um motor realizada conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 1585:1996 utiliza-se do equipamento denominado de dinamômetro (GESTEIRA, 2014). O procedimento pode ser realizado de duas maneiras: uma destas seria montando o motor em uma bancada e acoplando o volante do motor em uma célula dinamométrica, a outra seria posicionar um veículo sobre rolos inerciais, em um dinamômetro de chassi.

Comumente, para caracterizar o desempenho de um motor de combustão interna, utilizam-se as curvas de torque, potência e consumo específico de um combustível em função da rotação do motor. Qualquer que seja o tipo de freio dinamométrico empregado, hidráulico, mecânico ou elétrico, o motor é normalmente testado com o acelerador totalmente aberto, ou

seja, à plena carga de alimentação para fornecer a máxima potência. Regulando a eficácia de frenagem, pode-se diminuir a velocidade de rotação do motor até o frear totalmente (CHOLLET, 1981).

Para conhecer as características exatas do motor, mede-se a sua potência em diversos regimes de rotação iniciando-se por baixos regimes (1500 rpm, por exemplo) e posteriormente elevam-se os valores de rotação a intervalos definidos até atingir o regime máximo, assim a potência começa a diminuir. Os resultados irão constituir as curvas características do motor (CHOLLET, 1981).

Para RAHDE (2002), o conhecimento das características de um motor de combustão é possível medindo-se a potência em diversos regimes de rotação começando-se pelos baixos regimes (1000 rpm) e subindo de 250 em 250 rpm, por exemplo, até o regime máximo, a partir do qual a potência começa a diminuir. Os resultados obtidos permitem traçar a curva de potência do motor e geralmente também é traçada a curva de torque. O torque depende diretamente do impulso transmitido pelos pistões ao virabrequim. Ele informa de modo preciso sobre o enchimento dos cilindros e sobre a força expansiva da carga aspirada e queimada, sendo indicado em N.m. A curva de potência (em kW) é o produto do torque do motor em N.m pela velocidade de rotação do motor em rpm. Durante os testes no dinamômetro, mede-se com exatidão o consumo do carburante para cada regime de rotação. Conhecendo-se a potência desenvolvida, deduz-se o consumo específico de combustível.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, obtiveram-se os combustíveis comerciais diesel e biodiesel que foram utilizados para posterior preparação de *blends* diesel/biodiesel em várias proporções. O diesel utilizado no estudo foi o diesel S10 comercial (usado como padrão), possuindo em sua composição 10 % de biodiesel com teor máximo de 10 mg/kg de enxofre segundo a Resolução nº 11 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), sendo este obtido no posto de combustível Petrobrás Escola na cidade de Belo Horizonte - MG. Na Tabela 1 apresenta-se a especificação do diesel S10 segundo a ANP para a comercialização.

Tabela 1 - Especificação brasileira para o diesel S10 segundo ANP 50/2013

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO	
			ABNT/NBR	ASTM/EM
Aspecto (2)	-----	Límpido e isento de impurezas	14954	D4176
Cor	-----	(3)	-----	-----
Cor ASTM, máx.(5)	-----	3,0	14483	D1500 e D6045
Teor de biodiesel (6)	% volume	(7)	15568	EN 14078
Enxofre total, máx.	mg/kg	10,0 (8)	-----	D6622, D4294, D5453, D7039, D7220
DESTILAÇÃO				
10% vol., recuperados	°C	180,0	9619	D86
50% vol., recuperados		245,0 a 295,0		
85% vol., recuperados, máx.		-----		
90% vol., recuperados		-----		
95% vol., recuperados, máx.		370,0		
Massa específica a 20°C	Kg/m ³	815 a 850 (10)	7148, 14065	D1298, D4052
Ponto de fulgor, mín.	°C	38,0	7974, 14598	D56, D93, D3828
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm ³ /s	2,0 a 4,5	10441	D445
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(11)	14747	D6371
Número de cetano ou número de cetano derivado (NCD)	-----	48	-----	D613, D6890 e D7170
Resíduo de carbono nos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25	14318	D524
Cinzas, máx.	% massa	0,010	9842	D482
Corrosão ao cobre, 3h a 50°C, máx.	-----	1	14359	D130

(Continua)

Teor de água (13). Máx.	mg/kg	200	-----	D6304, EM ISSO 12937
Contaminação total (14), máx.	mg/kg	24	-----	EN 12662
Água e sedimentos, máx. (14)	% volume	0,05	-----	D2709
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (15), máx.	% massa	11	-----	D5186 e D6591 (16)
Estabilidade à oxidação (15), máx.	mg/ 100ml	2,5	-	D2274 (17) e D5304 (17)
Índice de neutralização	mgKOH/g	Anotar	14248	D974
Lubricidade, máx.	Mm	(18)	-----	D6079, ISSO 12156
Condutividade elétrica, mín (19)	pS/m	(25)	-----	D2624 e D4308

Fonte: Resolução ANP 50/2013. Adaptado.

(1) Poderão ser incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para óleo diesel obtido de processo diverso de refino e processamento de gás natural ou a partir de matéria prima distinta do petróleo.

(2) Deverá ser aplicado o procedimento 1 para cada método.

(3) Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente e alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.

(5) Limite requerido antes da adição do corante.

(6) Aplicável apenas para o óleo diesel B.

(7) No percentual estabelecido pela legislação vigente. Será admitida variação de +- 0,5% volume. A norma EM 14078 é de referência em caso de disputa para a determinação do teor de biodiesel no óleo diesel B.

(8) Para efeito de fiscalização nas autuações por não conformidade, será admitida variação de +5 mg/kg no limite da característica teor de enxofre do óleo diesel BS10, nos seguimentos de distribuição e revenda de combustíveis.

(10) Será admitida a faixa de 815 a 853 kg/m³ para o óleo diesel B.

(11) Limites conforme tabela II.

(13) Aplicável na produção e na importação do óleo diesel A S10 e a ambos os óleos diesel B na distribuição.

(14) Aplicável na importação, antes da liberação do produto para comercialização.

(15) Os resultados da estabilidade à oxidação e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos poderão ser encaminhados ao distribuidor até 48h após a comercialização do produto de modo a garantir o fluxo adequado do abastecimento. A partir de 1º de janeiro de 2015, o resultado do teor de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos deverá constar no Certificado da Qualidade no ato da comercialização do produto.

(16) Poderá ser determinado, alternativamente, pelo método EM 12916, aplicável ao óleo diesel B. Os métodos ASTM D5186 e D6591 não se aplicam ao óleo diesel B.

(17) Os métodos ASTM D2274 e D5304 aplicam-se apenas ao óleo diesel A.

(18) Poderá ser determinada pelos métodos ISSO 12156 ou ASTM D6079 sendo aplicáveis os limites de 460 µm a 520 µm respectivamente. A medição da lubricidade deverá ser realizada em amostra com biodiesel, no teor estabelecido pela legislação vigente, em conformidade com o § 9º do Art. 9º.

(19) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento /bombeio do combustível pelo produtor, importador e distribuidor. Para o óleo diesel A S500 deverá ser informado no Certificado da Qualidade a concentração de aditivo antiestático adicionada.

O biodiesel comercial utilizado é composto por material graxo de óleo de soja (43 %) e sebo (57 %) e o mesmo foi obtido por meio de doação realizado pela Petrobrás Biocombustível S.A localizada em (Montes Claros-MG). Na Tabela 2, apresentam-se os disponíveis dados de caracterização do biodiesel B100.

Tabela 2 - Informações do biodiesel utilizado nos testes

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO	UNIDADE
Aspecto	NBR 16048	LII (1)	LII (2)	Não aplicável
Massa específica a 20°C	NBR 14065	850 a 900	876,0	kg/m ³
Viscosidade cinemática a 40°C	NBR 10441	3,0 a 6,0	4,459	mm ² /s
Teor de água	ASTM D6304	200 máx	128	mg/kg
Contaminação total	EM 12662	24 máx	7,8	mg/kg
Ponto de fulgor	NBR 14598	100,0 mín	131,5	°C
Teor de éster	EM 14103	96,5 mín	97,6	% massa
Enxofre total	ASTM D5453	10 máx	8,3	mg/kg
Teor de sódio + potássio - Na ⁺ K	NBR 15556	5 máx	<0,6 (5)	mg/kg
Teor de cálcio + magnésio- Ca ⁺ Mg	NBR 15553	5máx	<0,2 (4)	mg/kg
Teor de fósforo	NBR 15553	10 máx	<0,1 (6)	mg/kg
Ponto de entupimento	NBR 14747	12 máx	8	°C
Índice de acidez total	ASTM D664	0,50 máx	0,16	mg KOH/g
Glicerina livre	ASTM D6584	0,02 máx	0,014	% massa
Glicerina total	ASTM D6584	0,25 máx	0,168	% massa
Teor de monoglicerídeos	ASTM D6584	0,7 máx	0,512	% massa
Teor de diglicerídeos	ASTM D6584	0,20 máx	0,106	% massa
Teor de triglicerídeos	ASTM D6584	0,20 máx	0,054	% massa
Índice de iodo	EN 14111	Anotar	89	g de iodo/100g
Estabilidade oxidação a 110°C	EN 14112	8,0 mín	10,7 (3)	H

Fonte: Dados do fabricante, 2017.

- (1) LII= Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.
 (2) Ensaio realizado a 27,5 °C.
 (3) Aditivado com antioxidante.
 (4) Resultado baseado no limite de quantificação método.
 (5) Resultado baseado no limite de quantificação método
 (6) Resultado baseado no limite de quantificação método

4.1 Preparação das amostras de combustíveis

A partir da obtenção dos combustíveis diesel S10 e biodiesel B100, houve a preparação de *blends* diesel-biodiesel. Para isso utilizaram-se de provetas para a obtenção de amostras nas proporções volumétricas conforme apresentação na Tabela 3.

Tabela 3 - *Blends* das amostras utilizadas nos testes em bancada dinamométrica

Nomenclaturas das amostras	Composições
B20	20% de Biodiesel e 80% de Diesel.
B40	40% de Biodiesel e 60% de Diesel.
B80	80% de Biodiesel e 20% de Diesel.

Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 5, apresentam-se as amostras de diesel/biodiesel (B20, B40 e B80) e dos combustíveis comerciais obtidos para a preparação dos *blends*.

Figura 5 - Amostras de combustíveis preparadas

Fonte: Próprio autor, 2018.

4.2 Caracterização das amostras combustíveis

Foram realizadas análises físico-químicas para todas as amostras de combustíveis apresentadas na Figura 5 buscando trazer maiores detalhes para avaliação do comportamento do motor ciclo diesel quando operado com cada formulação de combustível. Dessa forma, foram efetuadas as análises de massa específica e viscosidade cinemática.

4.2.1 Massa específica a 20°C

A massa específica das amostras foi determinada segundo o método ISO 3838 utilizando-se de picnômetro de vidro, sendo realizado no Laboratório de Tecnologia de Combustíveis da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri- Campus JK, Diamantina-MG.

Inicialmente foi medido, em balança analítica, a massa do picnômetro de 10 mL vazio (volume previamente aferido com água destilada), em seguida adicionou-se, ao recipiente, a amostra até a borda. Colocou-se então a tampa do instrumento em um movimento firme e contínuo, de maneira que o líquido em excesso saísse em jato pelo orifício da tampa. Posteriormente, limpou-se o exterior do picnômetro até estar bem seco e mediu-se a massa do picnômetro com a amostra no seu interior. Após a obtenção dos valores de massa do picnômetro vazio e do picnômetro com a amostra, a massa específica foi obtida a partir da Equação 3 (MOURA, 2010):

$$\text{Massa Específica} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{P_0 - P_1}{V} \times 1000 \quad (3)$$

P_0 = massa do recipiente com a amostra (g)

P_1 = massa do recipiente vazio (g)

V = volume do picnômetro (mL)

O procedimento de medida da massa específica foi realizado a uma temperatura média de 20 °C sendo efetuado em triplicata para todas as amostras, obtendo-se assim um valor de massa específica média. Na Figura 6 apresenta-se o picnômetro de vidro utilizado para a obtenção da massa específica a 20 °C das amostras combustíveis.

Figura 6 - Picnômetro utilizado para determinação da massa específica a 20°C



Fonte: Próprio autor, 2018

4.2.2 Viscosidade Cinemática a 40°C

O teste de viscosidade das amostras combustíveis foi realizado no Laboratório de Processos Orgânicos da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri- Campus JK, Diamantina-MG. Para a obtenção da viscosidade cinemática obtiveram-se inicialmente os valores de viscosidade dinâmica através da utilização de um viscosímetro rotativo da marca Brookfield (Modelo DV- III Ultra). No viscosímetro de Brookfield são efetuadas leituras de viscosidade automaticamente a cada temperatura, e também são realizadas leituras em diferentes velocidades de rotação do cilindro (torque).

Inicialmente as amostras de combustíveis foram aquecidas em banho-maria até a temperatura de 40°C e posteriormente realizou-se o teste no viscosímetro de Brookfield a uma velocidade de rotação de 250 rpm. As análises foram efetuadas em triplicata, sendo então reportados neste trabalho os valores médios obtidos pela triplicata de leitura do equipamento.

Após a obtenção dos valores de viscosidade dinâmica, utilizou-se a Equação 4 para a obtenção da viscosidade cinemática (BRUNETTI, 2008):

$$\text{Viscosidade Cinemática mm}^2/\text{s} = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

μ = viscosidade dinâmica (cP)

ρ = massa específica (g/cm³)

Na Figura 7 apresenta-se o viscosímetro de Brookfield utilizado neste para obtenção dos valores de viscosidade dinâmica das amostras de combustíveis.

Figura 7 - Viscosímetro utilizado para determinação da viscosidade dinâmica



Fonte: Próprio autor, 2018.

4.3 Dissolução das amostras combustíveis com gás hidrogênio

A dissolução de gás hidrogênio nas amostras combustíveis (diesel S10, B20, B40, 80 e B100) foi realizada na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) no laboratório GEAQM (Grupo de Eletroquímica e Química Ambiental), pertencente ao Departamento de Química.

O procedimento para a promoção dessa dissolução consistiu inicialmente na produção eletroquímica de gás hidrogênio conduzido através da reação de eletrólise da água pura. A obtenção de hidrogênio através desse processo ocorreu de acordo com a metodologia proposta por Sousa (2017).

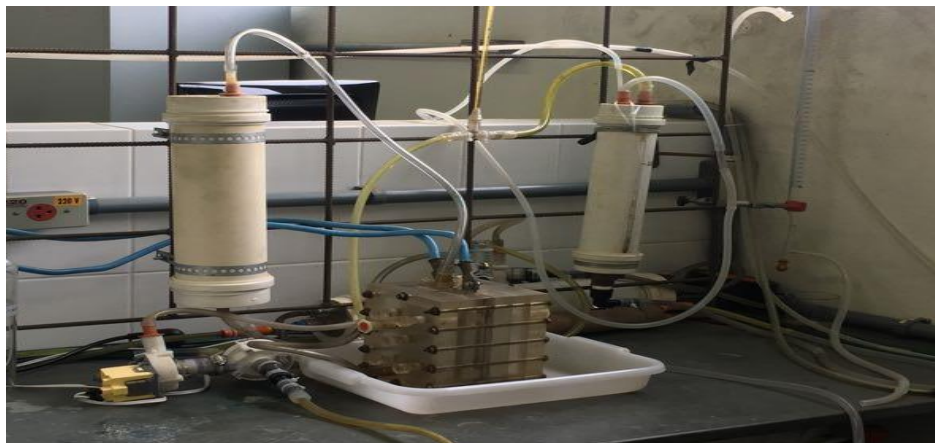
A dissolução consistiu em promover o borbulhamento de gás hidrogênio nas amostras de combustíveis durante 30 minutos em temperatura ambiente e em baixa pressão e baixa vazão. Para a realização desse processo montou-se um aparato experimental (apresentado na Figura 8) constituído de uma proveta de 250 mL, uma mangueira de silicone (por onde houve a transferência de gás hidrogênio para as amostras combustíveis) e uma pedra porosa (ligada à mangueira de silicone para a promoção da distribuição de gás hidrogênio de forma mais uniforme). Houve a utilização de um pequeno compressor de ar para a promoção de um maior fluxo de ar conseguindo promover assim a dissolução do gás hidrogênio nas amostras combustíveis. Posteriormente, é apresentado, na Figura 9, o reator eletroquímico que possibilitou a produção do gás hidrogênio utilizado neste estudo.

Figura 8 - Dispositivo utilizado para a dissolução das amostras combustíveis



Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 9 - Reator eletroquímico utilizado para a produção de hidrogênio



Fonte: SOUSA, 2017.

Uma opção utilizada para a quantificação da produção de gás é o tempo necessário que uma película manométrica de sabão gasta para percorrer um determinado volume conhecido da coluna de um equipamento. O equipamento utilizado para esta técnica é denominado de bolhômetro e é usada a muito tempo para determinar baixas e moderadas taxas de fluxo de gás (LEVY, 1964).

Para determinar o fluxo de gás hidrogênio produzido no reator eletroquímico utilizou-se de um fluxômetro/bolhômetro alternativo.

Para a construção do fluxômetro foi necessário realizar uma adaptação de uma bureta de precisão (100 mL), adaptando a entrada da mistura gasosa. Na parte inferior foi colocada uma tetina de borracha contendo solução de sabão. Os valores do fluxo volumétrico foram calculados a partir da razão entre o volume percorrido pelo menisco da película de sabão no interior do bolhômetro e o tempo gasto para percorrer todo o percurso da bureta, no qual apresenta um volume conhecido. Para cronometrar o tempo, foi usado um cronômetro digital. Cada valor de vazão foi obtido por média aritmética simples de no mínimo 3 leituras. Este procedimento visou minimizar os erros aleatórios relacionados ao manuseio do cronômetro e a leitura visual da posição do menisco no interior do bolhômetro. Com o novo fluxômetro foi possível quantificar o fluxo volumétrico da mistura gasosa com uma reprodutividade acima de 95 % (SOUSA, 2017).

Assim, mediu-se o tempo para o deslocamento de 50 mL de líquido obtendo a vazão volumétrica de aproximadamente 2 mL/minuto de gás hidrogênio. A Figura 10 apresenta o fluxômetro confeccionado em laboratório usado para quantificar o fluxo volumétrico de gás hidrogênio.

Figura 10 - Fluxômetro utilizado para quantificação de gás hidrogênio



Fonte: SOUSA, 2017.

Na Figura 11 apresentam-se as amostras combustíveis que passaram por dissolução por gás hidrogênio.

Figura 11 - Amostras de combustíveis com adição de gás hidrogênio



Fonte: Próprio autor, 2018.

4.4 Espectroscopia de Infravermelho

Os testes de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier foram realizados na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri- UFVJM, campus JK, Diamantina-MG, em um equipamento Thermo Scientific, modelo Nicolet 6700 acoplado a um módulo para reflectância total atenuada, ATR, entre 4000 e 400 cm^{-1} , janela de Germânio, 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1} . A obra de Barbosa (2007) foi uma das principais referências utilizadas para a interpretação dos dados obtidos.

4.5 Testes em bancada dinamométrica didática

4.5.1 Local de realização do experimento

Os testes para avaliação do desempenho das amostras combustíveis em bancada dinamométrica do tipo didática foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), localizado na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri- UFVJM, campus JK, em Diamantina-MG.

4.5.2 Composição da bancada dinamométrica

A bancada dinamométrica utilizada nos testes foi projetada para realizar os ensaios mais comuns de motores à combustão interna (MCI) de forma similar aos realizados em bancadas e motores de grande porte. Nas Tabelas 4 e 5 encontram-se as especificações, fornecidas pelo fabricante, dos componentes da bancada que foi utilizada nos testes, neste caso motor ciclo diesel monocilíndrico de 4 tempos, marca Branco, modelo BD 5.0 G2, e dinamômetro elétrico.

Tabela 4 - Características técnicas do motor ciclo diesel

PARÂMETROS	DADOS
Refrigeração	A ar
Eixo	Horizontal
Injeção	Direta
Área Pistão	70mm x 55mm de curso
Cilindradas	211 cm ³
Taxa de compressão	20:1
Potência máxima	5cv a 3600 rpm
Potência contínua	4,2cv a 3600 rpm
Rotação	3600 rpm
Capacidade de óleo	750 mL
Torque máximo	1,25 kgfm a 2500 rpm

Fonte: Manual do usuário: Dinamômetro para motor a combustão interna, modelo XL43, 2014.

O dinamômetro elétrico tem como base uma máquina de corrente contínua que pode operar como motor e como gerador. Na operação como motor, a máquina é utilizada como dispositivo de partida do MCI e no modo gerador, opera como carga mecânica do MCI e a

energia absorvida do MCI é transferida para uma resistência elétrica e então dissipada na forma de calor.

Tabela 5 - Características técnicas do dinamômetro elétrico

PARÂMETROS	DADOS
Potência	10,0 kW
Tipo	Corrente contínua de excitação independente
Rotação	380 Vca, 3F+N+T, 60Hz
Torque máximo	1,5 kgf.m

Fonte: Manual do usuário: Dinamômetro para motor a combustão interna, modelo XL43, 2014.

A bancada dinamométrica apresentada na Figura 12, possui sistema de monitoramento baseado em computador com processador I3® composto por sistema de aquisição de Dados National Instruments® e tela de operação Touch Screen com todos os comandos disponíveis na tela. Esse sistema fornece dados de rotação e torque dos combustíveis utilizados na bancada e a partir destes dados obteve-se os valores de potência média calculados através da Equação 5 (MIALHE, 1996):

$$Potência\ Média\ (kW) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{N}{60}\right) \cdot T}{1000} \quad (5)$$

$$\pi = 3,1416$$

$$N = \text{rotação (rpm)}$$

$$T = \text{torque (N.m)}$$

Figura 12 - Bancada dinamométrica utilizada no teste de combustíveis líquidos



Fonte: Próprio autor, 2018.

4.5.3 Testes na bancada com as amostras combustíveis

Inicialmente, antes de executar o teste na bancada dinamométrica com as dez amostras de combustíveis em estudo (diesel S10, B20, B40, B80, B100, diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂) colocou-se o motor para funcionar com combustível diesel próprio do laboratório até que houvesse todo o consumo do mesmo. Esse procedimento foi realizado para que houvesse o aquecimento e ambientação do motor, preparando-o para o início dos testes com as amostras de combustíveis.

A partir da bancada em estudo, realizaram-se dois tipos de testes, sendo estes realizados em triplicata para cada amostra testada. No primeiro teste, acoplou-se o motor ciclo diesel ao dinamômetro elétrico. Posteriormente acionou-se a rotação máxima do motor que é de 3600 rpm e variou-se a carga efetuada pelo dinamômetro até que houvesse a iminência do motor apagar.

A cada carga aplicada, foram obtidos e registrados valores de rotação (obtidos através de sensor indutivo) e torque (obtidos através de uma célula de carga com erro de fluência de 0,03 %) disponibilizados pelo sistema de monitoramento da bancada e posteriormente com estes dados realizaram-se os cálculos para a obtenção da potência média de acordo com a Equação 5.

O dinamômetro elétrico funciona como um gerador elétrico transformando a energia mecânica obtida através do trabalho realizado pelo motor ciclo diesel em energia elétrica. A energia que o motor de corrente contínua gera é controlado pelo sistema PWM (*Pulse Width Modulation* ou Modulação por largura de pulso). Com o uso de um potenciômetro é possível realizar a variação do fluxo da corrente elétrica nesse circuito, sendo controlado na bancada em questão o ajuste da largura de pulso PWM. Sendo assim, diferentes valores de largura de pulso (0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % e 100 %) podem ser aplicados neste circuito. Quanto maior a porcentagem de largura de pulso, mais energia elétrica está sendo gerada e deste modo o motor ciclo diesel precisa gerar maior potência no eixo o qual está acoplado ao dinamômetro para que não ocorra a interrupção de funcionamento do conjunto motorgerador.

Na Figura 13 apresenta-se o dispositivo utilizado para a promoção da variação de cargas impostas ao motor ao utilizar das misturas combustíveis em análise denominado de potenciômetro.

Figura 13 - Potenciômetro utilizado para variação de cargas



Fonte: Próprio autor, 2018.

No segundo teste não utilizou-se o dinamômetro, ou seja, não aplicou-se carga ao motor; sendo assim, o dinamômetro não exerceu nenhum tipo de esforço sobre o motor. Buscou-se com este segundo teste a avaliação de desempenho das amostras combustíveis nos quesitos torque e potência em variadas faixas de rotação proporcionadas pelo motor. Sendo assim, o desempenho das amostras combustíveis foram avaliados em cinco níveis de rotação: 1900 rpm, 2300 rpm, 2700 rpm, 3200 rpm e 3600 rpm,

O teste inicial foi realizado utilizando-se o diesel S10, que contém teor máximo de enxofre de 10 mg/kg e 10 % (v/v) de biodiesel em sua composição, sendo o mesmo considerado como mistura padrão para posterior comparação com todas as outras amostras combustíveis submetidas aos testes.

As trocas dos combustíveis foram realizadas após os mesmos serem consumidos até o final do volume do tanque, e a cada inserção de uma amostra diferente no motor diesel, deixava-se o mesmo funcionando por cerca de um minuto, até que toda a mistura nova entrasse na linha de combustível.

4.6 Delineamento experimental

O uso de pacotes estatísticos para a análise de dados é de grande importância no que se refere à análise e a interpretação de resultados, no entanto, observa-se que estes pacotes apresentam um custo de aquisição relativamente alto. Dentre os softwares de domínio público, livres, que podem ser utilizados para análise de dados em geral, encontra-se o Ambiente R, ou simplesmente R, conforme usualmente chamado pelos seus usuários. O mesmo apresenta código fonte aberto, podendo ser modificado ou implementado com novos procedimentos desenvolvidos por qualquer usuário a qualquer momento. Além disso, o *software* R possui

grande número de colaboradores das mais diversas áreas do conhecimento (SOUZA; PETERNELLI; MELLO, 2014).

Utilizou-se o *software* R para a realização do tratamento estatístico dos dados referentes às análises físico-químicas das amostras combustíveis (diesel S10, B20, B40, B80 e B100) e também para os dados obtidos para todas as amostras combustíveis testadas em bancada dinamométrica.

Foi feita a análise de variância (ANOVA) e as médias dos parâmetros analisados foram submetidas ao teste de Tukey a 5 % de probabilidade ($P < 0,05$) e ao ajuste dos modelos por regressão. A precisão foi avaliada por meio do coeficiente de determinação R^2 .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização das amostras

5.1.1 Massa específica e viscosidade cinemática

Para as amostras de diesel S10, B20, B40, B80 e B100 que não passaram por dissolução por meio de gás hidrogênio foram medidas as massas específicas e viscosidade cinemática, sendo os dados obtidos apresentados na Tabela 6.

O limite de massa específica para o diesel S10 contido no Regulamento Técnico ANP nº 4/2013 é de 815 a 850 kg/m³ e para o biodiesel B100 o limite é de 850 a 900 kg/m³ segundo o Regulamento Técnico ANP nº 3/2014. Os valores tanto de massa específica a 20 °C como de viscosidade cinemática a 40 °C encontram-se dentro dos valores estabelecidos pelos Regulamentos Técnicos vigentes.

De acordo com os dados apresentados, é possível verificar que o acréscimo de biodiesel na mistura diesel-biodiesel proporcionou o aumento de valores tanto de massa específica como de viscosidade cinemática. Como método de análise desses dados utilizou-se o teste de comparação de médias. Em relação à massa específica, houve diferença estatística a nível de 5 % de significância principalmente entre as médias das amostras de diesel S10 e B100, onde foram obtidos os valores de 840,25 kg/m³ e 870,76 kg/m³ respectivamente. Em relação à viscosidade cinemática, as amostras diesel S10, B20 e B40 possuem semelhança perante a comparação de médias e as médias das amostras B80 e B100 também são consideradas semelhantes estatisticamente.

Tabela 6 - Dados relativos de Massa específica a 20 °C e Viscosidade Cinemática a 40 °C para as amostras estudadas

Combustível	Massa Específica (kg/m ³)	Viscosidade Cinemática (mm ² /s)
Diesel S10	840,25 c	4,17 b
B20	852,68 bc	4,12 b
B40	865,34 ab	4,80 b
B80	865,02 ab	5,54 a
B100	870,76 a	6,06 a
C.V(%)	0,72	5,12

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada proporção de combustível utilizada, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Próprio autor.

5.2.2 Espectroscopia na região do infravermelho

As dez amostras de combustíveis analisadas (diesel S10, B20, B40, B80, B100, diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂) foram caracterizadas por Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) cuja técnica qualitativa permitiu identificar os grupos orgânicos importantes pertencentes a estes *blends*.

Nos espectros de infravermelho realizados para cada amostra combustível observam-se as principais bandas conforme apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Faixa de absorção dos grupos funcionais presentes nas amostras combustíveis

Ligação	Função	Faixa de absorção (cm ⁻¹)
ν CH	Hidrocarboneto	2920
δ CH	Hidrocarboneto	1453
ν S-H	Tiol	2357
ν C=O	Carbonila de éster	1746
δ CO	Ligação CO	1167
ν C-S	Ligação CS	722

Ligações: ν = estiramento δ = deformação

Fonte: Próprio autor, 2018

O Gráfico 1 apresenta os espectros de infravermelho dos combustíveis diesel S10, B20, B40, B80 e B100. No Diesel S10, em que há o incremento obrigatório de 10 % de biodiesel, observa-se uma sobreposição de bandas de diferentes estiramentos em 2920 cm⁻¹ simétricos e assimétricos de ligações de grupos CH₂, CH₃ e CH e também apresentou deformação do grupo CH em faixa de absorção de 1453 cm⁻¹ (BARBOSA, 2007). Esses grupos estão presentes em compostos como o óleo diesel, pois o mesmo é constituído principalmente por hidrocarbonetos (compostos orgânicos que contém átomos de carbono e hidrogênio) segundo a ANP (2014).

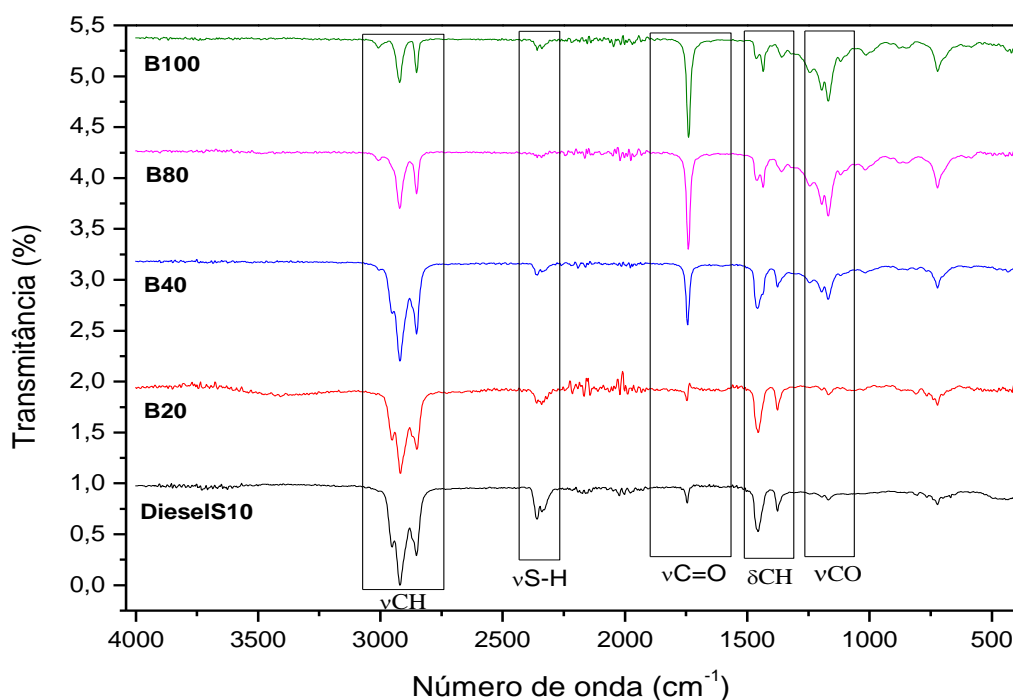
Conforme há o incremento de biodiesel no diesel, identificado nas outras amostras combustíveis analisadas (B20, B40, B80 e B100), observa-se que os respectivos espectros indicam que há menor largura e sobreposição de picos, e também uma diminuição da intensidade do pico nestas mesmas faixas de absorção analisadas (2920 cm⁻¹ e 1453 cm⁻¹).

De acordo com a Resolução nº 11 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) o diesel S10 é um combustível que apresenta 10 ppm de enxofre em sua composição, o que possivelmente pode ser confirmado através do seu espectro devido à presença de uma banda fraca em 2357 cm⁻¹ relativa ao estiramento S-H, acompanhada de uma banda de estiramento C-S em torno do número de onda 722 cm⁻¹ que confirma a presença do grupo Tiol

(vS-H), cujo grupo funcional apresenta enxofre em sua estrutura. Segundo Lobo, Ferreira e Cruz (2009), o biocombustível biodiesel possui quantidades muito baixas de enxofre o que possivelmente pode ser observado nos espectros das amostras (B20, B40, B80 e B100) cuja intensidade dos picos relativos ao estiramento S-H diminui de acordo com a pureza do biodiesel (quanto maior a quantidade de biodiesel, menor a quantidade de enxofre).

A análise dos espectros revelou a presença em todas as amostras combustíveis de duas regiões espectrais no infravermelho médio características da presença de biodiesel nos *blends*: 1.100 cm^{-1} a 1.200 cm^{-1} e 1.735 cm^{-1} a 1.750 cm^{-1} , que compreendem, respectivamente, o estiramento das ligações C-O e C=O de ésteres (GUARIEIRO *et al.*, 2008; ROCHA, 2013). O grupo carbonila de éster apresentou estiramento em 1746 cm^{-1} , e estiramento C-O em 1167 cm^{-1} confirmando a ligação característica do biodiesel. Pôde ser observado através dos espectros um aumento de intensidade do pico referente às vibrações de estiramento da ligação C=O de ésteres respectivamente do diesel S10 até a amostra B100, o que pode indicar que quanto maior a concentração de compostos carbonilados, maior será o percentual de biodiesel no diesel.

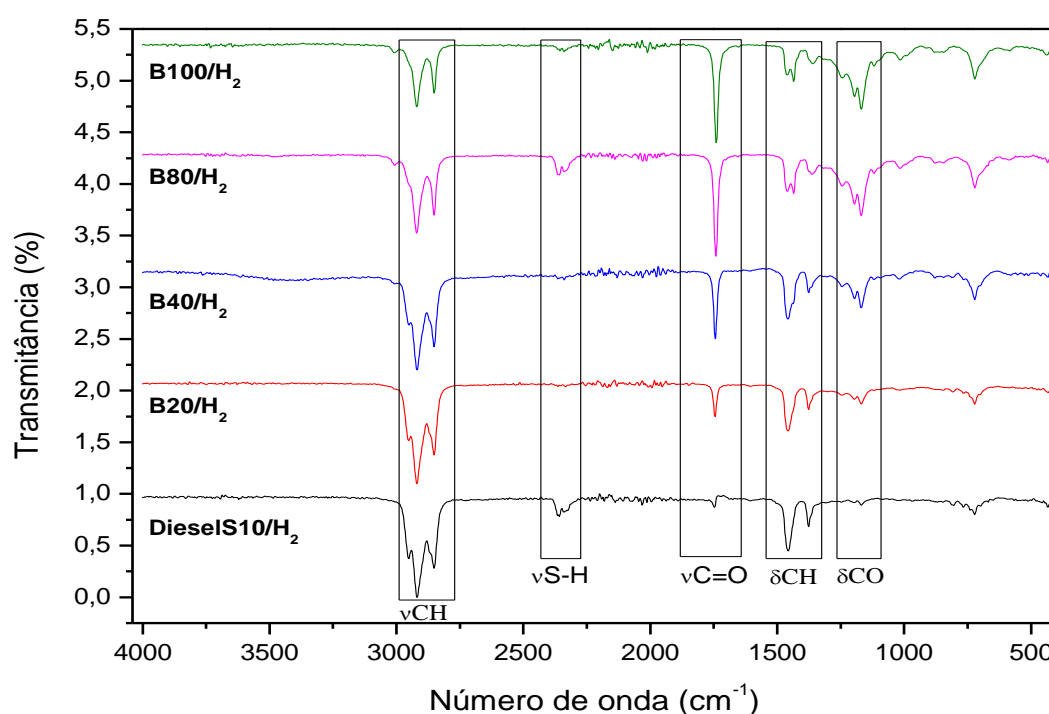
Gráfico 1 - Espectro de infravermelho dos combustíveis Diesel S10, B20, B40, B80 e B100



Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 2 apresenta os espectros de infravermelho dos combustíveis onde houve a promoção da dissolução por gás hidrogênio nos mesmos (diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂). Os espectros indicam a provável presença dos mesmos grupos funcionais presente nos espectros apresentados no Gráfico 1. A existência destes grupos funcionais indica que não houve alteração química após ter sido realizada a dissolução de gás hidrogênio nas amostras combustíveis, ou seja, não houve a hidrogenação dos compostos, o que aponta que possivelmente o H₂ foi dissolvido nas amostras através de um processo difusivo.

Gráfico 2 - Espectro de infravermelho dos combustíveis Diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂



Fonte: Próprio autor, 2018.

5.2 Desempenho das amostras no motor de combustão interna

5.2.1 Teste de variação de cargas

O primeiro experimento realizado em bancada dinamométrica consistiu em avaliar o desempenho das amostras de combustíveis (diesel S10, diesel S10/H₂, B20, B20/H₂, B40, B40/H₂, B80, B80/H₂, B100 e B100/H₂) em relação à rotação, torque e potência conforme variação de aumento consecutivo de cargas. Todas as amostras combustíveis conseguiram ser avaliadas para as variáveis rotação, torque e potência até a imposição da carga 7

(correspondente a 70 % de largura de pulso), posteriormente a esta carga, o motor veio a “apagar”, não sendo possível assim coletar dados referentes aos outros níveis de cargas existentes (que chegam até 100 % de largura de pulso).

A análise de variância em função da carga para a variável rotação indicou diferenças significativas a 5 % de probabilidade ($P < 0,05$) para os diferentes combustíveis analisados e para a interação combustível x carga. As fontes de variação combustível, carga e a interação destas fontes foram significativas, indicando estatisticamente uma possível diferença de desempenho do motor em relação ao nível de carga e em função do combustível utilizado, conforme apresentado na Tabela 8.

De acordo com o teste F, as médias de rotação de todos os combustíveis analisados são estatisticamente iguais quando estes são submetidos à avaliação de desempenho nas cargas de 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 %. Todas as amostras combustíveis conseguiram se manter com altos níveis de rotação até a imposição da faixa de carga de 50 %.

A diferença de desempenho dos combustíveis no quesito rotação frente ao aumento consecutivo de cargas ocorre a partir da carga de 60 %, no qual apenas o combustível B100 possui média de rotação diferente estatisticamente de todas as outras amostras combustíveis, obtendo o menor valor de rotação (3235 rpm) nesta faixa de carga.

A submissão das amostras de combustíveis à faixa de carga de 70 % foi a que apresentou uma maior diferença de desempenho entre os combustíveis. O melhor desempenho observado ocorreu com as amostras B20/H₂, B80/H₂ e B40/H₂ (médias de rotação estatisticamente iguais (3324 rpm, 3289 rpm e 3275 rpm respectivamente), pois as mesmas mantiveram um alto valor de rotação mesmo submetidas a um alto valor de carga. O pior desempenho ocorreu com a amostra B100 (3043 rpm), que também obteve o pior desempenho na faixa de carga de 60 % (3235 rpm).

O diesel S10, que é o combustível padrão em estudo, obteve desempenho estatisticamente igual a todas as amostras, exceto ao B100, na faixa de carga de 70 %. Comparando-se as amostras combustíveis que passaram por dissolução por gás hidrogênio em relação às amostras combustíveis que não passaram por esta dissolução, pôde-se perceber que a adição de H₂ nas amostras teve efeito positivo, pois foi possível obter melhores valores de rotação para os combustíveis B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂ do que para as respectivas amostras que não passaram por adição de gás hidrogênio na imposição de alta carga (70 %). Nas cargas de 0 % até 60 % a adição de gás hidrogênio não teve efeito significativo, exceto para o combustível B100, pois, a média encontrada de rotação para o B100/H₂ (3529 rpm) foi estatisticamente diferente e superior ao do B100 (3235 rpm).

Tabela 8 - Síntese da análise de variância dos valores médios de rotação (rpm) para as dez proporções de combustíveis analisadas e carga

Proporção	Variância dos valores médios de rotação							
	Carga (%)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
Diesel S10	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3588 a	3429 a	3267 ab
DieselS10/H ₂	3600 a	3600 a	3600 a	3588 a	3576 a	3552 a	3440 a	3248 ab
B20	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3588 a	3576 a	3441 a	3225 ab
B20/H ₂	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3588 a	3541 a	3402 a	3324 a
B40	3600 a	3600 a	3564 a	3564 a	3542 a	3541 a	3506 a	3135 bc
B40/H ₂	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3564 a	3541 a	3436 a	3275 a
B80	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3588 a	3541 a	3530 a	3214 ab
B80/H ₂	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3552 a	3541 a	3529 a	3289 a
B100	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3565 a	3530 a	3235 b	3043 c
B100/H ₂	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3600 a	3576 a	3529 a	3264 ab

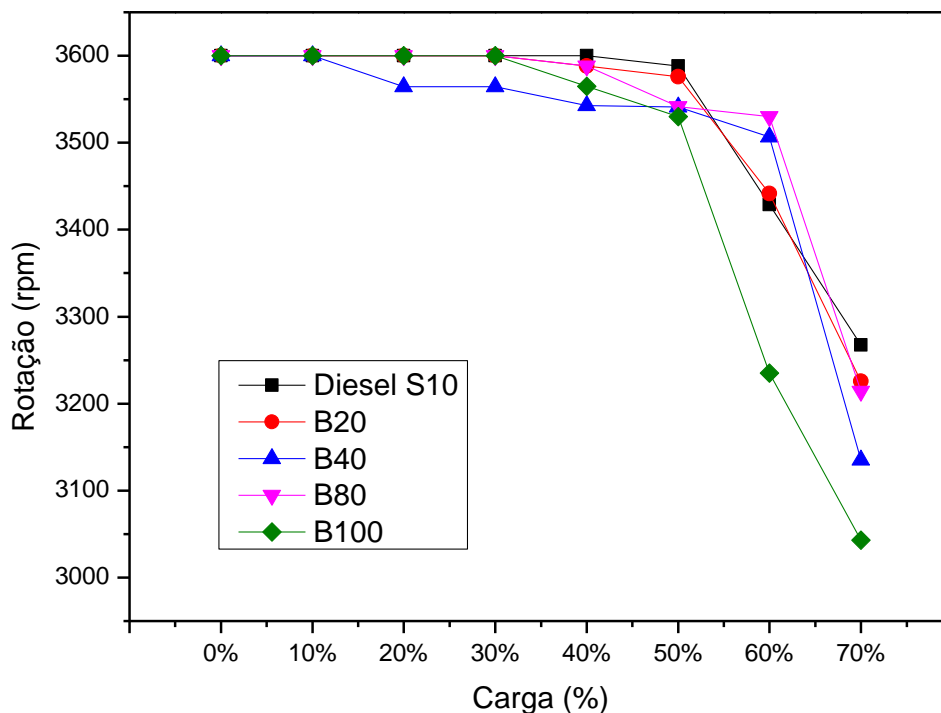
CV= 1,16 %. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada proporção de combustível utilizada, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey. Fonte: Próprio autor.

O Gráfico 3 apresenta as curvas de rotação frente ao aumento consecutivo de cargas impostas ao motor para as amostras combustíveis diesel S10, B20, B40, B80 e B100. O melhor desempenho neste teste em relação à variação de rotação ocorreu com a amostra diesel S10, pois este combustível conseguiu manter altas rotações mesmo a uma alta imposição de cargas (60 % e 70 %). Os valores de rotação encontrados para esta amostra foram 3429 rpm e 3267 rpm respectivamente a imposição das cargas de 60 % e 70 %. A amostra de biodiesel B100 foi a que obteve a maior queda de valor de rotação quando imposto a altas cargas (60 % e 70 %), sendo considerado assim o combustível com menor desempenho (3235 rpm e 3043 rpm respectivamente).

Na imposição das cargas iniciais (0 %, 10 %, 20 %, 30 % 40 % e 50 %) o desempenho entre todas as amostras combustíveis apresenta-se muito semelhante. Nota-se que para estas cargas iniciais a variação de rotação é praticamente nula, sendo as médias encontradas consideradas estatisticamente semelhantes.

O ajuste para as curvas de rotação se mostrou bastante preciso, apresentando coeficientes de determinação corrigidos R^2 de 0,98 para o Diesel S10; 0,97 para o B20; 0,99 para o B40; 0,91 para o B80 e 0,96 para o B100.

Gráfico 3 - Curvas de rotação para as amostras combustíveis, teste com variação de cargas



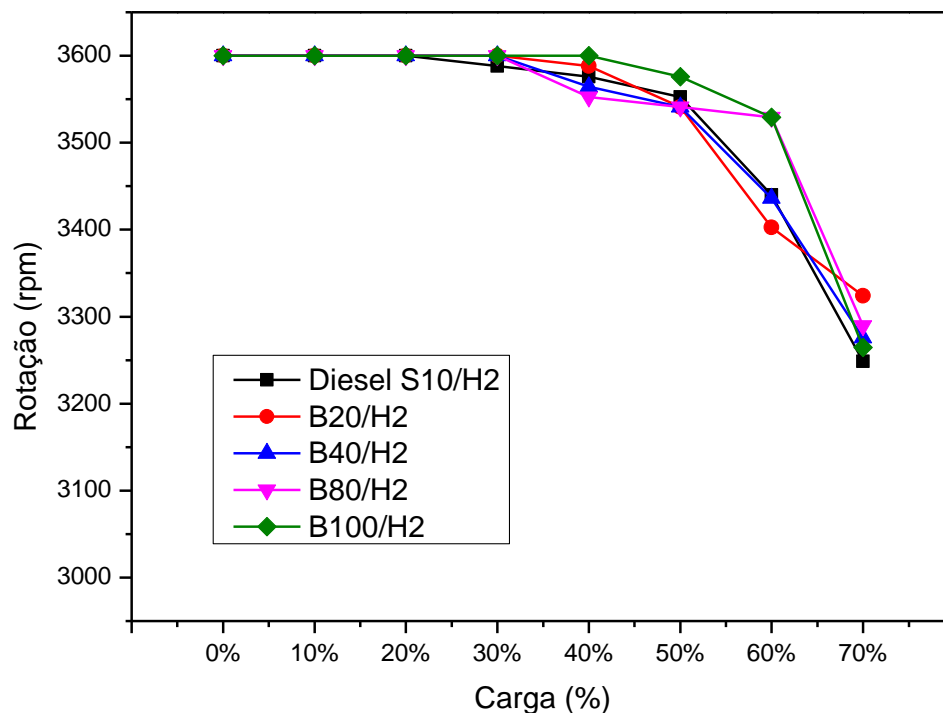
Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 4 apresenta as curvas de rotação frente ao aumento consecutivo de cargas impostas ao motor para as amostras de combustíveis diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂. Conforme apresentado na Tabela 8, o melhor desempenho avaliado em alta carga (70 %) ocorreu com a amostra B20/H₂ (3324 rpm), pois este combustível conseguiu manter altas rotações mesmo imposto a uma alta carga, mas o valor médio encontrado é estatisticamente igual a todas as outras amostras analisadas neste gráfico. O menor desempenho quando avaliado em alta carga (70 %) foi observado na amostra de Diesel S10/H₂ que alcançou rotação de 3248 rpm nesta faixa de carga.

Na imposição das cargas iniciais (0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 %) o desempenho entre todas as amostras combustíveis apresenta-se muito semelhante, sendo as médias encontradas consideradas estatisticamente semelhantes.

O ajuste para as curvas de rotação das amostras combustíveis com dissolução por H₂ apresentou os seguintes coeficientes de determinação corrigidos R^2 : de 0,99 para o diesel S10/ H₂; 0,92 para o B20/ H₂; 0,93 para o B40/ H₂; 0,97 para o B80/ H₂ e 0,99 para o B100/ H₂.

Gráfico 4 - Curvas de rotação para as amostras combustíveis com adição de H₂, teste com variação de cargas



Fonte: Próprio autor, 2018.

A análise de variância em função da carga para a variável torque indicou diferenças significativas a 5 % de probabilidade ($P < 0,05$) para os diferentes combustíveis analisados e também para a interação combustível x carga. As fontes de variação combustível, carga e a interação entre eles foram significativas, o que demonstra que houve diferença de desempenho do motor em relação ao nível de carga e em função do combustível utilizado conforme apresentado na Tabela 9.

De acordo com o teste F, as médias do fator torque para os dez diferentes combustíveis submetidos a oito níveis de cargas diferentes foram estatisticamente iguais para todos os combustíveis nas faixas de carga de 0 %, 10 %, 20 % e 50 %. Nas demais faixas de carga, houve diferença nas médias estatísticas encontradas. Conforme o aumento do valor de carga imposto ao motor para a avaliação das amostras, maiores foram os valores de torque obtidos e as diferenças de desempenho entre os combustíveis. Desempenho semelhante foi encontrado por Guimarães *et al.* (2018) cujos combustíveis analisados, diante ao aumento consecutivo de cargas, não apresentaram desempenho significativo em relação ao torque em

baixas cargas, havendo diferença de desempenho entre os combustíveis somente em altas cargas.

Tabela 9 - Síntese da análise de variância dos valores médios de torque (N.m) para as dez proporções de combustíveis utilizadas e cargas

Proporção	Variância dos valores médios de torque							
	Carga (%)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
DieselS10	1,20a	1,10a	1,10a	1,6b	3,25b	5,8a	9,5bc	9,45d
DieselS10/H ₂	2,00a	1,95a	1,90a	2,65a	4,25a	6,65a	9,8abc	11,85a
B20	1,40a	1,25a	1,25a	1,7ab	3,65ab	6,5a	9,6bc	11,15ab
B20/H ₂	1,70a	1,60a	1,55a	2,15ab	3,7ab	6,65a	10,6a	11,2ab
B40	1,50a	1,25a	1,25a	1,8ab	3,4ab	6,2a	9,65abc	11,4ab
B40/H ₂	1,65a	1,50a	1,50a	2,1ab	3,6ab	6,65a	10,3ab	11,05ab
B80	1,25a	1,20a	1,20a	1,7ab	3,25b	6,45a	9,5bc	10,65bc
B80/H ₂	1,45a	1,35a	1,35a	2,1ab	4,05ab	6,15a	9,35bc	11,05ab
B100	1,70a	1,35a	1,30a	1,9ab	3,9ab	6,5a	9,25c	9,9cd
B100/H ₂	1,30a	1,25a	1,25a	2,1ab	3,55ab	6a	9c	10,85bc

CV= 6,49 %. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada proporção de combustível utilizada, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey.

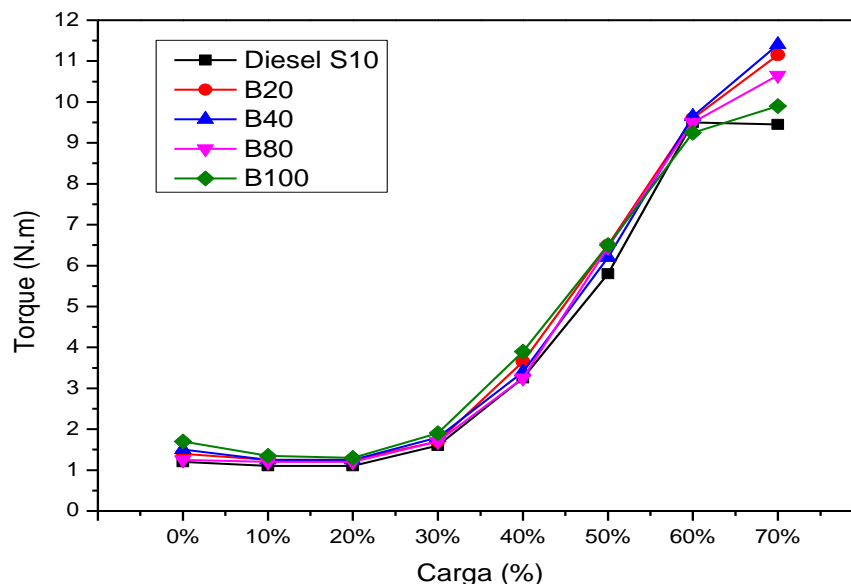
Fonte: Próprio autor.

O gráfico 5 apresenta as curvas de torque das amostras combustíveis sem adição de H₂ frente ao aumento consecutivo de cargas ao motor. Pode-se perceber um aumento para todas as amostras combustíveis de valor de torque conforme há o aumento de cargas. Fazendo uma analogia da carga utilizada e o peso de um veículo, entende-se que para veículos pesados, como caminhões, é necessário um maior torque para fazê-lo sair da inércia, sendo assim, tais resultados se mostraram coerentes.

As amostras combustíveis apresentaram um perfil de curva bem semelhante durante todas as cargas impostas, exceto na imposição da carga de 70 %, cujas médias entre os combustíveis analisados foram diferentes estatisticamente para a maioria das amostras. O combustível B40 foi o que obteve o melhor desempenho, pois apresentou maior valor de torque na faixa de 70 % de carga (11,4 N.m). O Diesel S10 foi o combustível com pior desempenho, pois obteve o menor valor de torque nestas mesmas condições (9,45 N.m).

O ajuste para as curvas de torque se mostrou bastante preciso, apresentando coeficientes de determinação corrigidos R² de 0,96 para o Diesel S10; 0,97 para o B20; 0,97 para o B40; 0,99 para o B80 e 0,99 para o B100.

Gráfico 5 - Curvas de torque para as amostras combustíveis, teste com variação de cargas



Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 6 apresenta as curvas de torque frente ao aumento consecutivo de cargas impostas ao motor para as amostras de combustíveis que passaram por dissolução por gás hidrogênio: Diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂. Pode-se avaliar a partir da análise das curvas que houve um aumento consecutivo do valor de torque para todas as amostras combustíveis conforme o aumento do valor de carga, esse aumento foi bem semelhante para as todas as amostras analisadas, mas tendo como destaque a amostra combustível de Diesel S10, cujo torque foi o maior tanto no início como no fim da imposição de cargas (2,00 N.m e 11,85 N.m respectivamente).

Um melhor desempenho dos combustíveis referente ao torque do motor é evidenciado nas amostras combustíveis com adição de gás hidrogênio em comparação com as que sem adição deste gás, mas esse melhor desempenho observado com as amostras com gás hidrogênio somente é evidenciado quando o motor é submetido a altas cargas (60 % e 70 %) conforme pode ser observado através da avaliação das médias de torque apresentadas na Tabela 9. Nas cargas iniciais, todas as amostras analisadas possuem valores médios de torque muito semelhantes, a diferença de desempenho ocorre principalmente a partir da imposição da carga de 60 %.

Todos os valores de torque alcançados quando imposto a alta carga (70 %) foram maiores nos combustíveis gás hidrogênio, exceto para o combustível B40/ H₂ (11,05 N.m), mas

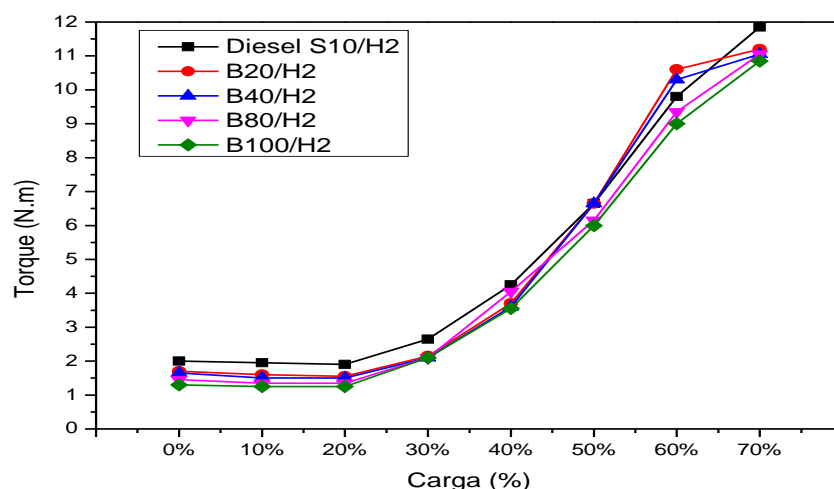
mesmo assim, o torque obtido por ele é estatisticamente igual ao da amostra B40 (11,4 N.m). A amostra que sofreu maior influência da adição de gás hidrogênio foi a amostra de Diesel S10, pois a mesma sem adição de hidrogênio foi a que obteve o menor valor de torque (9,45 N.m) dentre todas as dez amostras de combustíveis analisadas, e após a dissolução, esta amostra foi a que obteve o maior valor de torque (11,85 N.m) alcançado na faixa de 70 % de carga.

Por meio da Tabela 9 pode-se perceber que a adição de gás hidrogênio nas amostras combustíveis obteve resultados significativos principalmente para os combustíveis Diesel, B80 e B100, pois a dissolução promoveu um maior alcance de valor de torque (11,85 N.m, 11,05 N.m, 10,85 N.m respectivamente em alta faixa de carga (70 %) quando comparado a estes mesmos combustíveis sem dissolução por H_2 (9,45 N.m, 10,65 N.m e 9,9 N.m respectivamente).

Sendo assim, a adição de gás hidrogênio nas amostras combustíveis mostrou-se de grande importância, pois promoveu um melhor desempenho em relação ao torque tanto no combustível padrão utilizado atualmente, quanto nos combustíveis com alta quantidade de biodiesel (B80 e B100) que são tão importantes de serem estudadas, visto a necessidade de maior utilização de fontes renováveis de energia, mas, como os combustíveis com maiores quantidades de biodiesel tem demonstrado queda de desempenho em motores, a utilização do mesmo com gás hidrogênio mostrou que é possível a obtenção de um bom desempenho, neste caso para o torque e em altas imposições de cargas.

O ajuste para as curvas de rotação das amostras combustíveis com dissolução por H_2 foram bem precisos apresentando os seguintes coeficientes de determinação corrigidos R^2 : 0,98 para o Diesel S10/ H_2 ; 0,98 para o B20/ H_2 ; 0,98 para o B40/ H_2 ; 0,98 para o B80/ H_2 e 0,99 para o B100/ H_2 .

Gráfico 6 - Curvas de torque para as amostras combustíveis com adição de H₂, teste com variação de cargas



Fonte: Próprio autor, 2018.

A análise de variância em função da carga para a variável potência indicou diferenças significativas a 5 % de probabilidade ($P < 0,05$) para os diferentes combustíveis analisados e também para a interação combustível x carga. As fontes de variação combustível, carga e a interação combustível x carga foram significativas, demonstrando assim diferença de desempenho do motor em relação ao nível de carga e em função do combustível utilizado conforme apresentado na Tabela 10.

De acordo com o teste F, as médias do fator potência para as dez amostras de combustíveis submetidas a oito níveis de cargas diferentes foram estatisticamente iguais para todos os combustíveis nas faixas de carga de 0 %, 10 %, 20 % e 50 %. Nas demais faixas de carga, houve diferença estatística nas médias encontradas. Conforme o aumento do valor de carga imposto ao motor para a avaliação das amostras, maiores eram os valores de potência obtidos e maiores eram as diferenças de desempenho entre os combustíveis. Esse desempenho é semelhante ao encontrado por Guimarães *et al.*, (2018) cujos combustíveis analisados, diante ao aumento consecutivo de cargas, não apresentaram desempenho significativo relacionados à potência em baixas cargas, havendo diferença de desempenho entre os combustíveis somente na mais alta carga avaliada.

O desempenho obtido pelas amostras no quesito potência durante todas as faixas de carga analisadas foi muito semelhante ao desempenho encontrado para as mesmas amostras quando elas foram avaliadas quanto ao quesito torque. O comportamento encontrado e avaliado na Tabela 10 mostra-se assim coerente, pois a potência é uma grandeza diretamente

proporcional ao torque. Sendo assim, quanto maior é o aumento do valor de torque, maior também é o aumento do valor de potência de um motor.

Tabela 10 - Síntese da análise de variância dos valores médios de potência (kW) para as dez proporções de combustíveis utilizadas e cargas

Proporção	Variância dos valores médios de potência							
	Carga (%)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
DieselS10	0,45 a	0,41 a	0,41 a	0,60 b	1,22 b	2,17 a	3,41 bcd	3,23 d
DieselS10/H ₂	0,75 a	0,73 a	0,71 a	0,99 a	1,59 a	2,47 a	3,53 abc	4,03 a
B20	0,52 a	0,47 a	0,47 a	0,64 b	1,37 ab	2,43 a	3,45 bc	3,76 abc
B20/H ₂	0,64 a	0,60 a	0,58 a	0,81 ab	1,39 ab	2,46 a	3,77 a	3,89 ab
B40	0,56 a	0,47 a	0,46 a	0,67 b	1,26 b	2,29 a	3,54 abc	3,74 abc
B40/H ₂	0,62 a	0,56 a	0,56 a	0,79 ab	1,34 ab	2,46 a	3,69 ab	3,79 abc
B80	0,47 a	0,45 a	0,45 a	0,64 b	1,22 b	2,39 a	3,51 abc	3,58 c
B80/H ₂	0,54 a	0,50 a	0,50 a	0,79 ab	1,50 ab	2,28 a	3,45 bc	3,80 abc
B100	0,64 a	0,50 a	0,49 a	0,71 ab	1,45 ab	2,40 a	3,13 d	3,15 d
B100/H ₂	0,49 a	0,47a	0,47 a	0,79 ab	1,33 ab	2,24 a	3,32 cd	3,70 bc

C.V= 5,82 %. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada proporção de combustível utilizada, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Próprio autor.

No gráfico 7 observam-se as curvas de potência frente ao aumento consecutivo de cargas para as amostras de Diesel S10, B20, B40, B80 e B100. Quando submetida a baixas cargas, a amostra que obteve melhor resultado foi o combustível B100 (mesmo este sendo estatisticamente igual ao de todas as outras amostras), já em altas cargas (60 % e 70 %), este combustível foi o que apresentou o pior desempenho (3,3 kW e 3,15 kW respectivamente), juntamente com o Diesel S10 (3,41 kW e 3,23 kW respectivamente). As amostras que proporcionaram maior potência quando submetidos a altas cargas (70 %) foram as amostras B20 e B40 (cujos valores médios não diferem entre si a 5 % de probabilidade, 3,76 kW e 3,7 kW respectivamente). Esse resultado é semelhante ao encontrado por Silva *et al.* (2012), em que foi observado alto desempenho em *blend* B20 quando comparado ao óleo diesel. Essas amostras também obtiveram maiores valores de torque em altas faixas de carga.

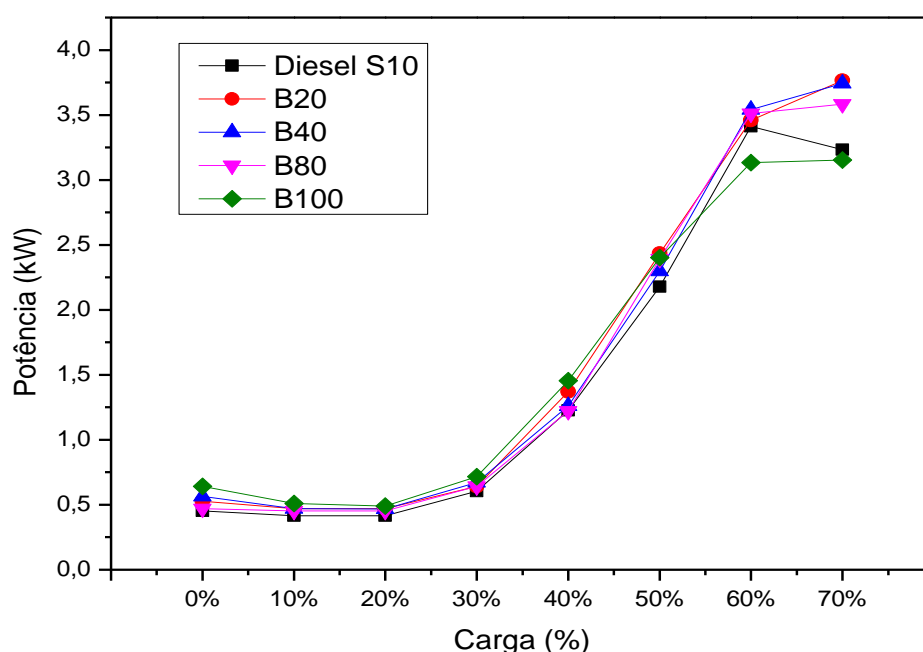
O melhor poder efetivo observado nesses combustíveis em comparação ao diesel S10 pode estar relacionado ao aumento no número de cetano e maior concentração de oxigênio em misturas que possuem maiores quantidades de biodiesel, proporcionado possivelmente uma melhora na queima de combustível que ocorre dentro da câmara de combustão (TEIXEIRA, 2010). Em relação às misturas com grandes quantidades de biodiesel como nas amostras B80

e B100, o menor desempenho observado pode ter sido afetado pelo menor poder calorífico e maior viscosidade do biodiesel que compromete a queima de combustível e reduz o desempenho do motor (GUIMARÃES *et al.*, 2018).

Em relação ao combustível diesel S10, o mesmo obteve os mais baixos valores de potência em todas as faixas de cargas analisadas, sendo a mesma que também obteve menores valores de torque quando comparadas às outras amostras de combustíveis principalmente em alta carga (70 %).

O ajuste para as curvas de potência apresentou os seguintes coeficientes de determinação corrigidos R^2 de 0,96 para o diesel S10; 0,97 para o B20; 0,97 para o B40; 0,98 para o B80 e 0,98 para o B100.

Gráfico 7 - Curvas de potência para as amostras combustíveis, teste com variação de cargas



Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 8 apresenta as curvas de potência frente ao aumento consecutivo de cargas impostas ao motor para as amostras de combustíveis que passaram por dissolução por gás hidrogênio: diesel S10/H₂, B20/H₂, B40/H₂, B80/H₂ e B100/H₂. Pode-se avaliar a partir da análise das curvas que houve um aumento consecutivo do valor de potência para todas as amostras combustíveis conforme a imposição de cargas cada vez mais elevadas, sendo este

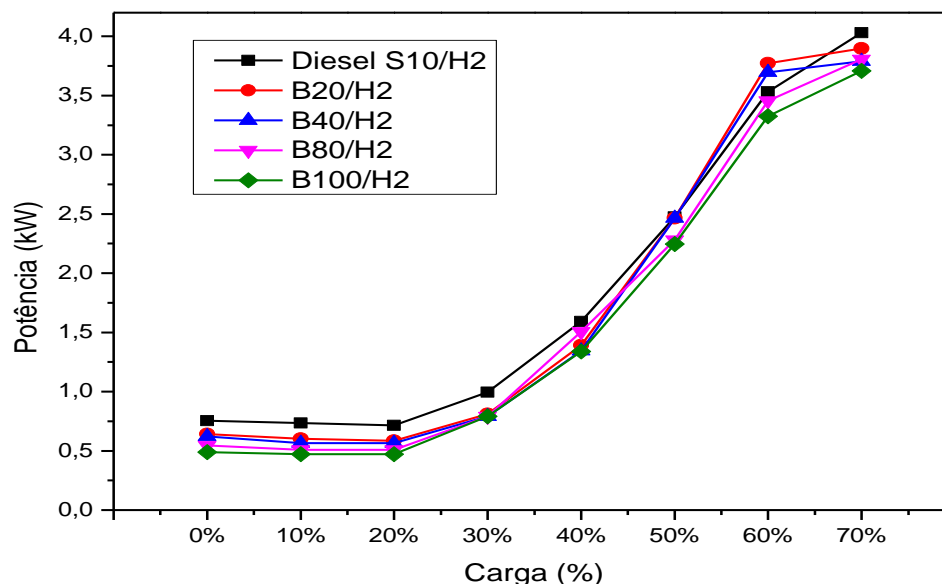
aumento bem parecido para todas as amostras analisadas, mas a amostra combustível de diesel S10/H₂ foi a que obteve o maior valor de potência (4,03 kW) alcançada quando imposta a alto valor de carga (70 %). Essa amostra obteve melhor desempenho quando comparado as outras amostras com dissolução por gás hidrogênio desde as faixas iniciais de imposição de cargas (0 %, 10 %, 20 %, 30 % e 40 %). O pior resultado dentre as amostras apresentadas no Gráfico 8 ocorreu para o combustível B100/H₂, que obteve os menores valores de potência durante toda a faixa de carga analisada (0,49; 0,47; 0,47; 0,79; 1,33; 2,24; 3,32 e 3,70 (kW) respectivamente).

Comparando-se os valores de potência alcançados das amostras combustíveis sem dissolução e das amostras combustíveis com adição de gás hidrogênio, percebe-se que o desempenho das amostras de combustíveis que sofreram dissolução fora melhor que os combustíveis que não sofreram. Este desempenho foi também observado por Baltacioglu *et al.* (2016). A amostra que sofreu maior influência da adição de gás hidrogênio foi a amostra de diesel S10. Tal amostra obteve o maior valor de potência (4,03 kW) na imposição de carga 70 % quando comparado com as dez amostras de combustíveis analisadas (conforme pode ser observado na Tabela 10). A amostra de diesel S10 que não sofreu dissolução na faixa de carga citada acima, foi a que obteve o pior desempenho (3,23 kW) dentre todas as dez amostras, mostrando assim que a adição de gás hidrogênio provocou um efeito importante e significativo, melhorando consideravelmente o desempenho desta amostra nesta faixa de condição de carga.

Pode-se dizer que a adição de gás hidrogênio teve influência significativa principalmente para as amostras de combustíveis de diesel S10 e B100 quando submetidas a alta carga (70 %), pois o mesmo proporcionou um melhor alcance de valores médios de potência nas amostras que sofreram dissolução do que nas respectivas amostras sem adição do gás hidrogênio. Em relação as amostras B20, B40 e B80, a adição de gás hidrogênio não teve efeito significativo na mesma faixa de carga analisada, pois os valores médios obtidos pelos respectivos combustíveis com adição de hidrogênio foram muito semelhantes, não sendo considerados estatisticamente diferente entre si.

O ajuste para as curvas de rotação das amostras combustíveis com adição de H₂ se apresentaram bem precisos. Os coeficientes de determinação corrigidos R² foram os seguintes: 0,98 para o Diesel S10/ H₂; 0,97 para o B20/ H₂; 0,97 para o B40/ H₂; 0,98 para o B80/ H₂ e 0,99 para o B100/ H₂.

Gráfico 8 - Curvas de potência para as amostras combustíveis com adição de H₂, teste com variação de cargas



Fonte: Próprio autor, 2018.

5.2.2 Teste de variação de rotação

O segundo teste consistiu na análise de curvas de desempenho de torque e potência dos combustíveis sem dissolução e com dissolução por H₂ em motor ciclo diesel com base em variadas rotações que ocorreram entre as faixas de 1900 rpm a 3600 rpm.

A análise de variância em função da rotação para a variável torque apontou diferenças significativas a 5 % de probabilidade ($P < 0,05$) para os diferentes combustíveis analisados e para a interação combustível x rotação. As fontes de variação combustível, rotação e a interação entre eles apresentaram-se altamente significativas, evidenciando que houve diferença de desempenho do motor tanto em relação ao combustível utilizado como em função do nível de rotação. Os níveis de rotação avaliados foram 1900 rpm, 2300 rpm, 2700 rpm, 3200 rpm e 3600 rpm.

Na Tabela 11, encontram-se os dados obtidos dos valores médios de torque em função dos diferentes níveis de rotação analisados e das dez amostras de combustíveis estudadas.

Tabela 11 - Síntese da análise de variância dos valores médios de torque (N.m) segundo variadas rotações para as dez proporções de combustíveis utilizadas

Proporção	Variância dos valores médios de torque				
	Rotação (rpm)				
	1900	2300	2700	3200	3600
DieselS10	1,25 cd	0,8 c	2,15 c	1,2 d	1,15 c
DieselS10/H ₂	1,5 abc	1,9 ab	2,75 ab	2,05 a	1,75 a
B20	1,65 ab	0,9 c	2,55 b	1,7 bc	1,4 bc
B20/H ₂	1,4 bc	2,2 a	2,95 a	2,05 a	1,5 ab
B40	1,75 a	0,95 c	1,85 cd	1,45 cd	1,3 bc
B40/H ₂	1,05 d	1,9 ab	2,75 ab	1,8 ab	1,35 bc
B80	1,35 bcd	0,8 c	1,65 d	1,3 d	1,15 c
B80/H ₂	1,65 ab	1,95 ab	2,1 c	1,5 bcd	1,4 bc
B100	1,65 ab	1,05 c	1,9 cd	1,35 d	1,5 ab
B100/H ₂	1,45 abc	1,65 b	1,85 cd	1,3 d	1,2 bc

CV= 6,32 %. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada proporção de combustível utilizada, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Próprio autor.

O Gráfico 9 representa as curvas de torque com base na variação de rotação das cinco amostras combustíveis sem adição por gás hidrogênio. Pode-se perceber que no menor valor de rotação analisado (1900 rpm), o combustível que obteve o maior torque foi a amostra B40 (1,75 N.m) e o menor torque foi obtido pela amostra de diesel S10 (1,25 N.m), já com o maior valor de rotação disponível (3600 rpm), o combustível que obteve o melhor desempenho foi a amostra B100 (1,5 N.m) que conseguiu manter o maior torque em maior rotação quando comparado aos outros combustíveis. Os combustíveis que obtiveram o menor desempenho nesta faixa de rotação foram os combustíveis diesel S10 e B80 (1,15 N.m e 1,15 N.m respectivamente (médias de torque não diferem entre si)).

Posteriormente à faixa de rotação de 1900 rpm, houve uma queda de desempenho de torque para todas as amostras analisadas até a faixa de 2300 rpm, sendo nesta faixa o menor valor de torque obtido para todas as amostras avaliadas. Após a faixa de 2300 rpm, houve um aumento do valor de torque até a faixa de 2700 rpm. Todos os combustíveis analisados no Gráfico 9 apresentaram maiores valores de torque nesta faixa de rotação (2700 rpm), e posteriormente a esta faixa houve uma queda de valor de torque também para todas as amostras até a faixa de 3600 rpm, exceto para a amostra B100, pois o desempenho identificado na curva de rotação para esta amostra indicou que houve queda somente até a faixa de aproximadamente 3200 rpm e posteriormente a esta faixa houve aumento de torque até a faixa de 3600 rpm.

As interações feitas no Teste de Tukey mostraram que o maior torque obtido pelo motor ocorreu com o uso do combustível B20, obtendo valor médio de torque de 2,55 N.m na faixa de rotação de 2700 rpm, e o menor torque ocorreu na faixa de rotação de 2300 rpm com as amostras de diesel S10 e B80, que obtiveram mesmo valor de torque nesta faixa de rotação (0,8 N.m) mas, de acordo com a Tabela 11, os valores obtidos por estes combustíveis não são diferentes estatisticamente dos mesmo encontrados para as amostras B20, B40 e B100, demonstrando assim que todos os combustíveis analisados no Gráfico 9, para a faixa de rotação de 2300 rpm obtiveram mesmo desempenho, e este foi o menor dentre todas as faixas de rotações analisadas.

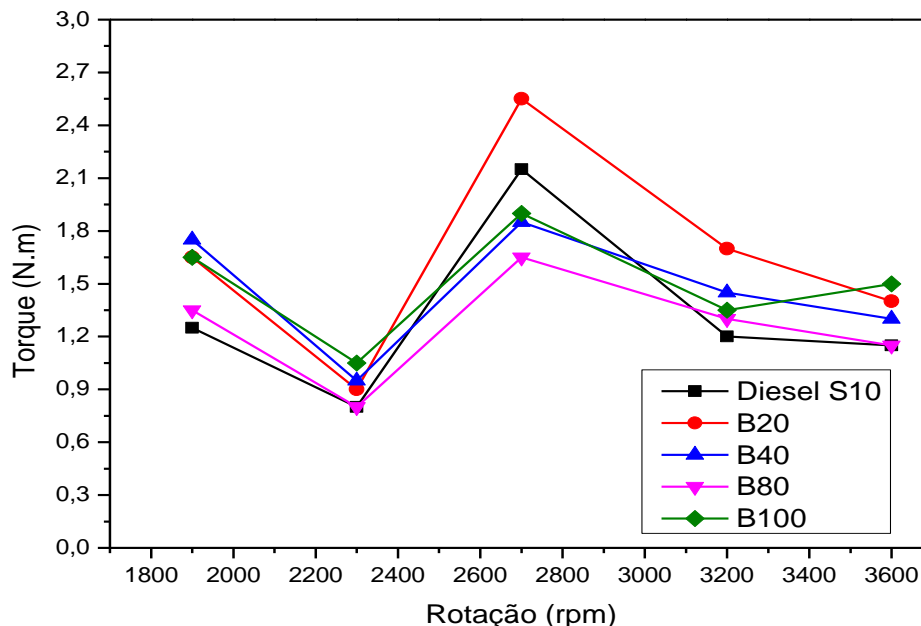
Ao se utilizar do combustível B20, o motor apresentou praticamente os maiores valores de torque, evidenciando assim, ser este o melhor combustível em relação ao desempenho de torque, pois o mesmo alcançou os melhores valores em vários níveis de rotação aos quais foi submetido, e utilizando-se do combustível B80 o motor apresentou os valores mais baixos de torque em praticamente todas as faixas de rotações avaliadas.

Castellanelli *et al.* (2008), trabalhando com misturas de biodiesel etílico de soja em motor de injeção direta, constataram que a mistura diesel/biodiesel B20 apresentou desempenho superior ao do diesel. Para as outras misturas, houve queda gradual de desempenho à medida que se aumentou a percentagem de biodiesel na mistura; o biodiesel puro (B100) foi o que apresentou o pior desempenho.

Em relação ao combustível diesel S10, o mesmo obteve desempenho inferior principalmente em relação aos combustíveis B20 e B40, exceto na faixa de rotação de 2700 rpm, cujo valor de torque foi o segundo melhor encontrado (2,15 N.m), ficando abaixo somente do B20 (2,55 N.m), mas, mesmo assim, o desempenho de torque alcançado pelo diesel ao longo de todas as rotações avaliadas pode ser considerado um dos mais inferiores juntamente com a amostra B80. Em relação ao combustível comercial B100, o mesmo obteve destaque somente na faixa de rotação de 3600 rpm, cujo valor de torque alcançado (1,5 N.m) foi o maior dentre todos os combustíveis.

O ajuste para as curvas de rotação das amostras combustíveis apresentou coeficientes de determinação corrigidos R^2 precisos para os combustíveis B20 (R^2 de 0,90); B40 (R^2 0,93); B80 (R^2 0,88) e B100 (R^2 0,84).

Gráfico 9 - Curvas de torque para as amostras combustíveis, teste com variação na rotação



Fonte: Próprio autor, 2018

O Gráfico 10 apresenta as curvas de torque com base na variação de rotação das amostras combustíveis com adição de gás hidrogênio. Pode-se perceber que no menor valor de rotação analisado (1900 rpm), o combustível que obteve o maior torque foi a amostra B80/H₂ (1,65 N.m) e o menor foi o B40/ H₂ (1,05 N.m), já com o maior valor de rotação disponível (3600 rpm), o combustível que obteve maior desempenho foi a amostra de diesel S10/H₂ (1,75 N.m), pois conseguiu manter o maior torque em maior rotação quando comparado aos outros combustíveis e o menor desempenho foi com a amostra B100/H₂ (1,2 N.m), cujo valor de torque obtido é considerado estatisticamente igual às médias obtidas pelos combustíveis B40/H₂ e B80/H₂.

A distribuição geral no Gráfico 10 nos apresenta um aumento de torque para todas as amostras combustíveis quando há a variação de rotação de 1900 rpm até faixa de 2700 rpm. Todas as amostras tiveram o seu maior desempenho na faixa de rotação de 2700 rpm, na qual obtiveram seus maiores valores de torque. A amostra combustível de destaque nesta faixa de rotação foi a B20/H₂ (torque de 2,95 N.m). Posteriormente, ao aumentar a rotação até 3600 rpm há uma queda de valor de torque para todas as amostras combustíveis.

Dentre todas as faixas analisadas, o menor desempenho para todos os combustíveis ocorreu nas faixas de 1900 rpm e 3600 rpm, cujo torque foram os mais baixos registrados.

Comparando-se o desempenho das amostras sem e com adição de gás hidrogênio pode-se perceber que a adição de gás hidrogênio influenciou positivamente o desempenho das amostras combustíveis, pois as amostras contendo gás hidrogênio tiveram um aumento gradual de valor de torque de 1900 rpm até 2700 rpm, ao contrário das amostras combustíveis sem adição por gás hidrogênio, sendo que, neste mesmo intervalo de rotação houve uma queda de desempenho de torque na rotação de aproximadamente 2300 rpm. Além disso, as amostras contendo gás hidrogênio foram as que obtiveram os maiores valores de torque quando comparado aos combustíveis que não passaram por dissolução em todas as faixas de rotação analisadas, exceto na faixa de 1900 rpm cuja amostra sem dissolução (B40) foi a que obteve o maior valor de torque dentre todas as amostras apresentadas.

A partir de uma análise total dos dados apresentados na Tabela 11, pode se dizer que a adição de gás hidrogênio foi significativa principalmente para os combustíveis Diesel, B20, B40 e B80 nas faixas de rotação de 2300 rpm, 2700 rpm e 3200 rpm.

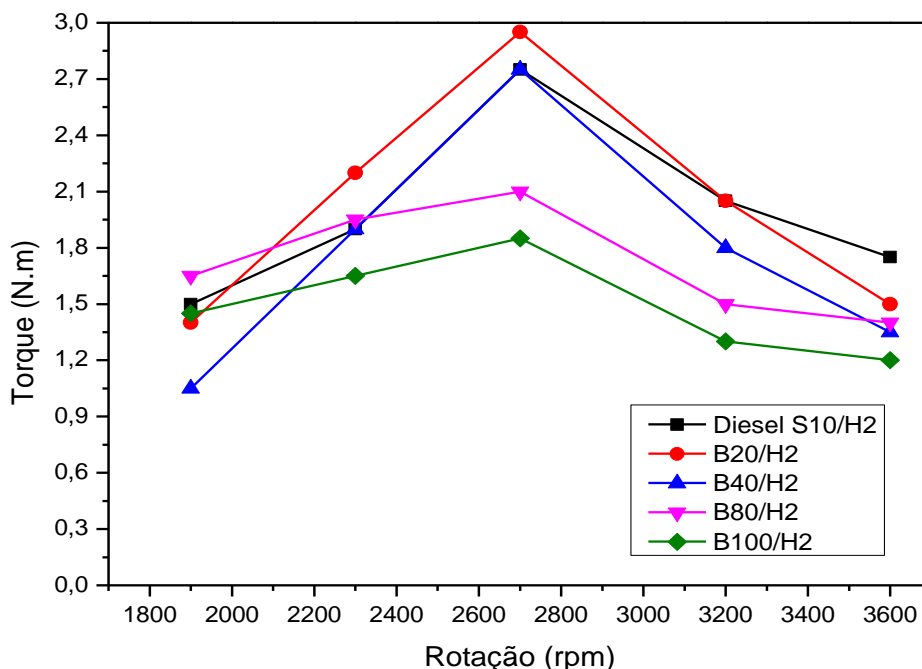
Na menor faixa de rotação analisada (1900 rpm) a adição de hidrogênio foi significativa principalmente para as amostras de diesel S10 e B80 e em relação ao desempenho de torque em altas rotações (faixa de 3600 rpm) a adição de H_2 nas amostras combustíveis influenciou positivamente e significativamente principalmente para os combustíveis diesel S10, B20 e B80.

Em relação ao combustível B100, a adição de gás hidrogênio não teve influência positiva, pois a amostra B100 sem adição de gás hidrogênio, nas faixas de rotação de 1900 rpm e 3600 rpm obteve melhores resultados que o B100/ H_2 , enquanto que nas faixas de 2300 rpm, 2700 rpm e 3200 rpm, as médias encontradas para os combustíveis B100 e B100/ H_2 são consideradas estatisticamente iguais.

Pode-se concluir que, dentre as dez amostras de combustíveis analisadas em relação ao seu desempenho de torque em variadas rotações, a amostra que obteve melhor desempenho foi o *blend* B20/ H_2 , pois obteve alto valor de torque em variadas rotações, e os combustíveis que obtiveram o pior desempenho quando analisadas todas as rotações, foram as amostras de Diesel S10 e B80, cujos níveis de torque alcançados foram os mais baixos na maioria das faixas de rotação analisadas.

O melhor coeficiente de determinação corrigidos R^2 ocorreu para o combustível B100/ H_2 : R^2 0,76.

Gráfico 10 - Curvas de torque para as amostras combustíveis com adição de H₂, teste com variação na rotação

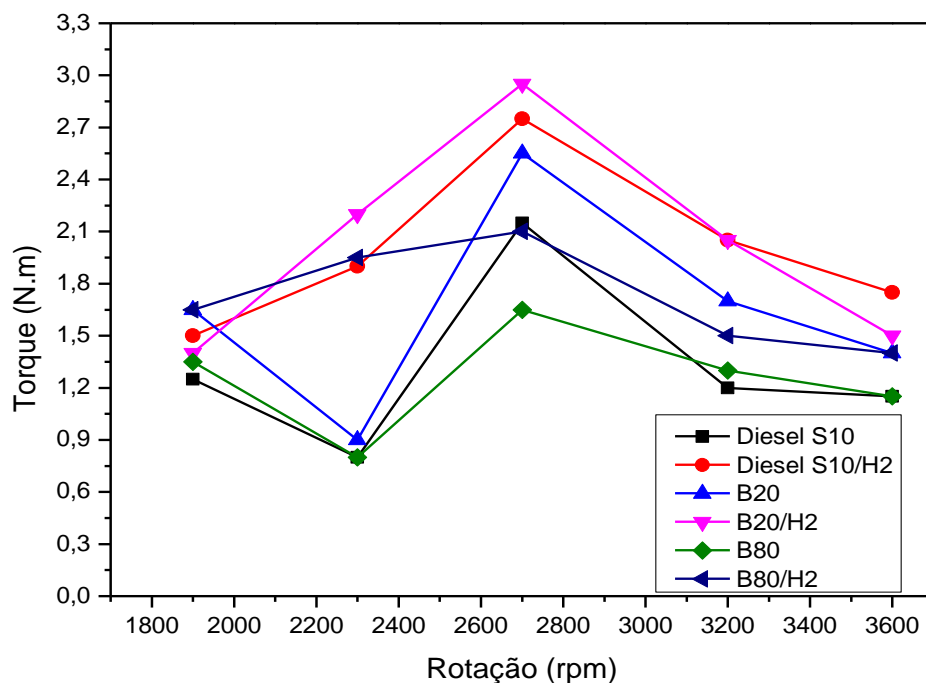


Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 11 representa as curvas de torque (com base nos dados médios apresentados na Tabela 11), para as amostras combustíveis que obtiveram melhor desempenho com adição de H₂ em comparação com as mesmas amostras que não sofreram dissolução. Todos os combustíveis que passaram por dissolução por H₂ obtiveram melhor desempenho que as mesmas amostras sem adição de gás hidrogênio em todas as faixas de rotações analisadas conforme apresenta o Gráfico 11. Somente o combustível B20, na faixa de rotação de 1900 rpm, é que obteve um valor um pouco acima do B20/H₂ (1,65 N.m e 1,4 N.m respectivamente).

A adição de gás hidrogênio apresentou-se como uma maneira significativa de promoção de melhoria de desempenho no quesito torque para as amostras combustíveis quando submetidas a variadas rotações.

Gráfico 11 - Curvas de torque para as amostras combustíveis que obtiveram melhor desempenho com adição de H₂ em comparação com as mesmas amostras sem adição de H₂, teste com variação na rotação



Fonte: Próprio autor, 2018.

A análise de variância em função da rotação para a variável potência demonstrou que há diferenças significativas a 5 % de probabilidade ($P < 0,05$) para os diferentes combustíveis analisados e para a interação combustível x rotação. As fontes de variação combustível, rotação e a interação combustível x rotação apresentaram-se altamente significativas, evidenciando que houve diferença de desempenho do motor tanto em relação ao combustível utilizado como em função do nível de rotação.

Na Tabela 12, encontram-se os dados obtidos dos valores médios de potência em função de diferentes níveis de rotação e de amostras combustíveis.

Tabela 12 - Síntese da análise de variância dos valores médios de potência (kW) segundo variadas rotações para as dez proporções de combustíveis utilizadas

Proporção	Variância dos valores médios de potência				
	Rotação (rpm)				
	1900	2300	2700	3200	3600
DieselS10	0,09 bc	0,07 c	0,23 c	0,15 e	0,16 d
DieselS10/H ₂	0,11 abc	0,17 ab	0,29 ab	0,26 a	0,25 a
B20	0,12 ab	0,08 c	0,27 b	0,21 bc	0,20 bc
B20/H ₂	0,10 abc	0,20 a	0,31 a	0,26 a	0,21 b
B40	0,13 a	0,08 c	0,19 cd	0,18 cde	0,18 bcd
B40/H ₂	0,07 c	0,17 ab	0,29 ab	0,23 ab	0,19 bcd
B80	0,10 abc	0,07 c	0,17 d	0,16 de	0,16 d
B80/H ₂	0,12 ab	0,17 ab	0,22 c	0,19 cd	0,20 bc
B100	0,12 ab	0,09 c	0,19 cd	0,17 de	0,21 b
B100/H ₂	0,11 abc	0,15 b	0,20 cd	0,16 de	0,17 cd

CV= 5,98 %. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, para cada proporção de combustível utilizada, não diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Próprio autor.

O Gráfico 12 apresenta as curvas de potência com base na variação de rotação das amostras combustíveis sem adição de gás hidrogênio.

Pode-se perceber que no menor valor de rotação analisado (1900 rpm), o combustível que alcançou a maior potência foi a amostra B40 (0,13 kW), e a mais baixa potência foi obtida com o diesel S10 (0,09 kW), cujos resultados já eram esperados visto que nesta mesma faixa de rotação ocorreram o mesmo desempenho para estas amostras no quesito torque. Já com o maior valor de rotação disponível (3600 rpm), o combustível que obteve maior desempenho foi a amostra B100 (0,21 kW) e o pior desempenho ocorreu para as amostras de diesel S10 e B80 (0,16 kW e 0,16 kW- médias não diferem entre si a 5% de probabilidade), valores também já esperados em virtude de mesma ocorrência para estas amostras para o quesito torque.

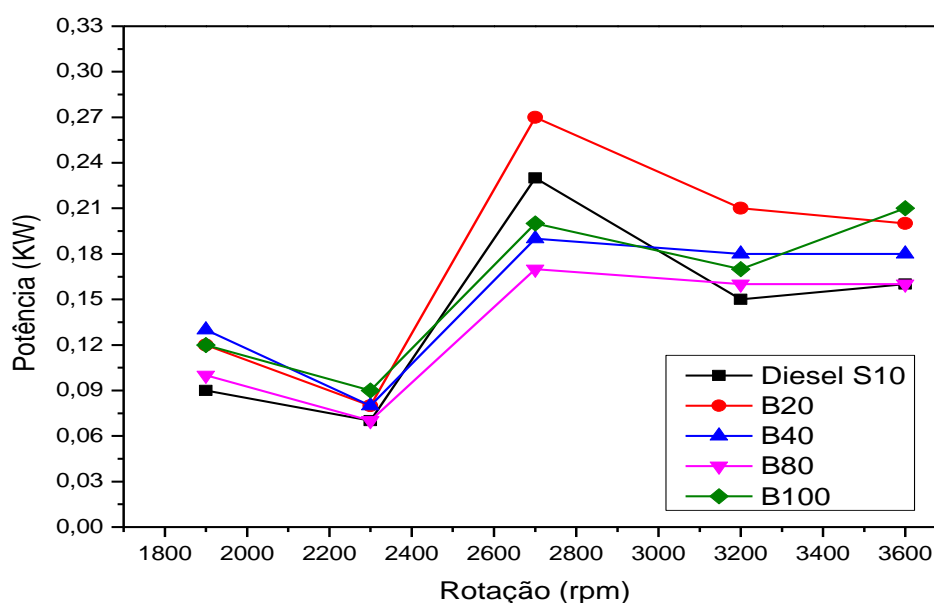
O Gráfico 12 nos apresenta um decréscimo do valor de potência para todas as amostras combustíveis quando há a variação de rotação de 1900 a aproximadamente 2300 rpm e posteriormente a esta faixa de rotação houve um aumento tendo o pico máximo de potência ocorrido na faixa de rotação de aproximadamente 2700 rpm para todas as amostras combustíveis, exceto para a amostra B100, que obteve o maior valor de potência alcançado na faixa de 3600 rpm. A amostra com a maior potência encontrada foi a B20 (0,27 kW), em rotação de 2700 rpm e a rotação onde se obteve o menor valor de potência foi encontrado na faixa de 2300 rpm, sendo todas as amostras analisadas consideradas com o mais baixo desempenho devido a todas possuírem médias estatisticamente iguais entre si.

Castellanelli *et al.* (2008) explicam que, se a diferença nos valores de torque e potência se mantém ao longo das curvas, pode-se justificá-la devido à inferioridade do biodiesel em relação ao diesel na propriedade de poder calorífico. Entretanto, quando se observa maior distanciamento entre as curvas a partir de certas faixas de rotação, infere-se que há também atomização ineficiente do combustível, devido à maior viscosidade atribuída a maiores teores de biodiesel na mistura. Essa atomização deficiente ocasiona prejuízos inerentes à queima do combustível. Em estudo de caracterização do óleo diesel e biodiesel, Costa Neto *et al.* (2000) verificaram que o poder calorífico inferior aferido para o óleo diesel foi $42,30 \text{ MJ kg}^{-1}$ e para o biodiesel de óleo de soja foi de $37,50 \text{ MJ kg}^{-1}$. Para o poder calorífico inferior do biodiesel (B100), obteve-se o resultado de $35,39 \text{ MJ kg}^{-1}$.

O diesel S10, que é o combustível padrão, foi a amostra que obteve o menor desempenho quando imposto à menor e à maior faixa de rotação (1900 rpm e 3600 rpm) respectivamente, tendo tido destaque somente na faixa de rotação de 2700 rpm, cujo valor de potência (0,23 kW) foi o segundo melhor alcançado em comparação às outras amostras.

O ajuste para as curvas de rotação das amostras combustíveis apresentou os seguintes coeficientes de determinação corrigidos R^2 : 0,92 para o B20; 0,89 para o B40; 0,90 para o B80 e 0,86 para o B100.

Gráfico 12 - Curvas de potência para as amostras combustíveis, teste com variação na rotação



Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 13 apresenta as curvas de potência com base na variação de rotação das amostras combustíveis que foram submetidas à dissolução por gás hidrogênio. Pode-se perceber que no menor valor de rotação analisado (1900 rpm), algumas amostras combustíveis tiveram desempenho muito parecido, mas o combustível que alcançou a maior potência foi a amostra B80/H₂ (0,12 kW) e a menor potência alcançada foi pelo combustível B40/H₂ (0,07 kW). Já com o maior valor de rotação disponível (3600 rpm), o combustível que obteve maior desempenho foi a amostra de diesel S10 (0,25 kW), obtendo maior valor de potência quando comparado aos outros combustíveis e o menor valor de potência foi obtido por meio do combustível B100/H₂ (0,17 kW).

As curvas apresentadas no Gráfico 13 identificam um aumento do valor de potência da menor faixa de rotação avaliada até a faixa de rotação de 2700 rpm, na qual todas as amostras de combustíveis alcançaram seu maior valor de potência, sendo o combustível B20/H₂ seguido da amostra diesel/H₂ e B40/H₂ as que obtiveram os melhores valores (0,31 kW; 0,29 kW e 0,29 kW respectivamente). Posteriormente a essa faixa de rotação, houve um decréscimo do valor de potência para as amostras B80/H₂ e B100/H₂ até a faixa de aproximadamente 3200 rpm e após a esta faixa houve um aumento de potência destas amostras até a faixa de 3600 rpm. Já para as amostras diesel S10/H₂, B20/H₂ e B40/H₂ percebe-se que houve uma queda do valor de potência da faixa de 2700 rpm até a faixa de 3600 rpm, mas estas três amostras obtiveram na faixa de rotação de 3200 rpm valores de potência acima das amostras B80/H₂ e B100/H₂.

Comparando-se o Gráfico 13 com o Gráfico 12, pode-se perceber que a adição de gás hidrogênio influenciou positivamente o desempenho das amostras combustíveis, pois as mesmas tiveram um aumento gradual de valor de potência de 1900 rpm até 2700 rpm, ao contrário das amostras combustíveis sem adição por gás hidrogênio, sendo que, neste mesmo intervalo de rotação houve uma queda de desempenho de potência da faixa de 1900 rpm até a faixa de 2300 rpm. Além disso, as amostras com a presença do gás hidrogênio foram as que obtiveram os maiores valores de potência quando comparado aos combustíveis que não passaram por dissolução em todas as faixas de rotação analisadas, exceto na faixa de 1900 rpm cuja amostra sem dissolução pelo gás (B40) foi a que obteve o maior valor de potência.

A partir de uma análise geral dos dados apresentados na Tabela 12, pode se dizer que a adição de gás hidrogênio foi significativa principalmente para os combustíveis diesel, B20, B40 e B80 nas faixas de rotação de 2300 rpm, 2700 rpm e 3200 rpm.

Na menor faixa de rotação analisada (1900 rpm) a adição de hidrogênio foi significativa somente para as amostras de diesel e B80. Já em alta rotação (faixa de 3600 rpm)

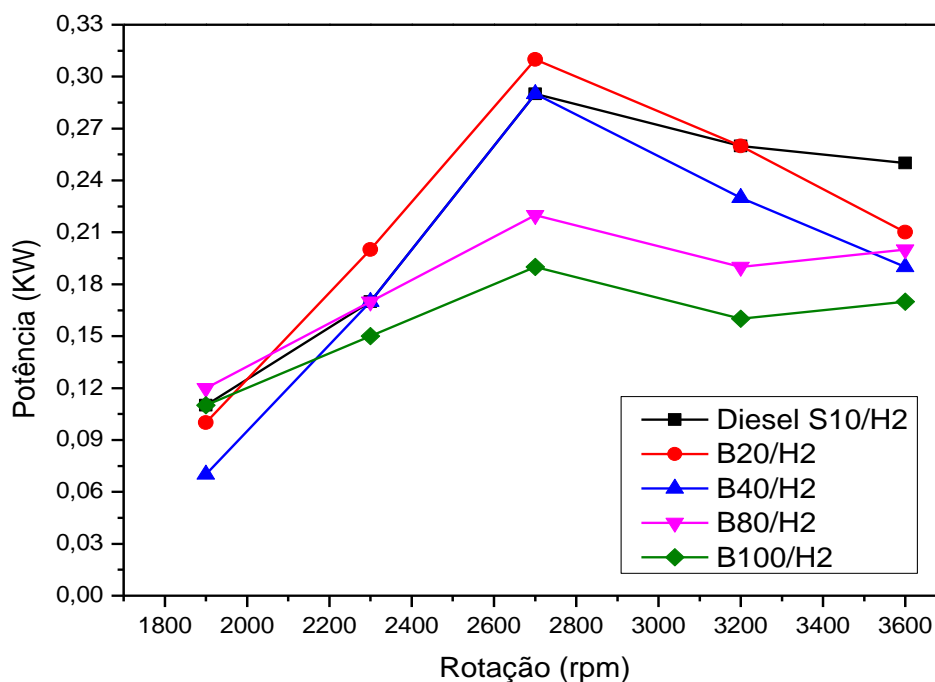
a adição de H_2 nas amostras combustíveis influenciou significativamente somente para os combustíveis diesel S10, B20 e B80.

Para o combustível B100, a dissolução por gás hidrogênio não teve influência significativa, pois a amostra B100 sem dissolução, nas faixas de rotação de 1900 rpm e 3600 rpm obteve melhores resultados que o B100/ H_2 , enquanto que nas faixas de 2300 rpm, 2700 rpm e 3200 rpm, as médias encontradas para os combustíveis B100 e B100/ H_2 são consideradas estatisticamente iguais.

Pode-se concluir que dentre todas as dez amostras de combustíveis analisadas o melhor desempenho de potência ocorreu para o *blend* B20/ H_2 , pois o mesmo obteve o maior valor de potência em variadas rotações quando comparado entre todas as amostras, e o combustível que obteve o pior desempenho foram as amostras de diesel S10 e B80, cujos níveis de potência alcançados foram os mais baixos na maioria das faixas de rotação analisadas.

O coeficiente de determinação corrigido R^2 mais preciso ocorreu para o combustível B100/ H_2 : 0,89.

Gráfico 13 - Curvas de potência para as amostras combustíveis com adição de H_2 , teste com variação na rotação



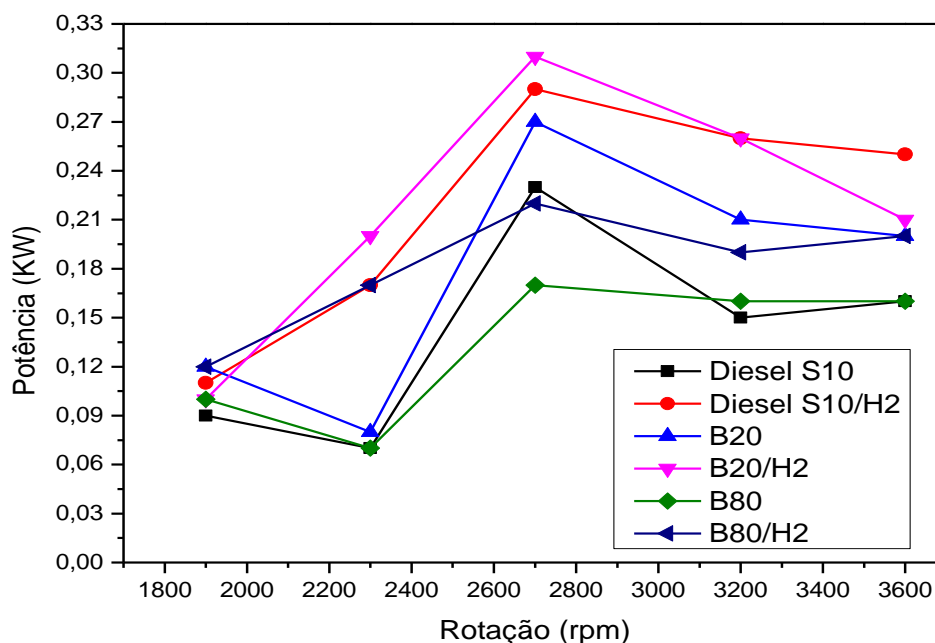
Fonte: Próprio autor, 2018.

O Gráfico 14 representa as curvas de potência (com base nos dados médios apresentados na Tabela 12), para as amostras combustíveis que obtiveram melhor desempenho

com adição de gás H_2 em comparação com as mesmas amostras que não sofreram dissolução. Todos os combustíveis apresentados nesse gráfico que não passaram por dissolução por H_2 , obtiveram melhor desempenho em todas as faixas de rotação quando foram saturados. Somente o combustível B20, na faixa de rotação de 1900 rpm, é que obteve um valor um pouco acima do B20/ H_2 .

A adição de gás hidrogênio apresentou-se como uma maneira significativa de promoção de melhoria de desempenho no quesito potência principalmente para o combustível diesel S10, pois este, juntamente com o *blend* B80, obteve o menor desempenho, alcançando os menores valores de potência dentre todas as faixas de rotações analisadas. Mas, após a dissolução por hidrogênio do combustível diesel S10, essa amostra passou a ter um dos melhores desempenhos dentre todas as amostras, principalmente quando exposto a altas rotações (3200 rpm e 3600 rpm), alcançando os melhores valores (0,26 kW e 0,25 kW respectivamente) registrados nesta faixa de rotação quando comparado a todas as outras nove amostras.

Gráfico 14 - Curvas de potência para as amostras combustíveis que obtiveram melhor desempenho com adição de H_2 em comparação com as mesmas amostras sem adição de H_2 , teste com variação na rotação



Fonte: Próprio autor, 2018.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As caracterizações referentes à análise de massa específica e de viscosidade cinemática mostraram valores similares em relação aqueles existentes na literatura, sendo que as amostras estudadas apresentaram valores dentro da especificação vigente.

Os espectros obtidos através da análise de espectroscopia de infravermelho indicam a presença de mesmos grupos funcionais para as amostras combustíveis antes e após a adição de H_2 , indicando que não houve a formação de graxa nas condições estabelecidas para o experimento realizado.

No primeiro teste em bancada dinamométrica, utilizou-se do dinamômetro e avaliou-se o desempenho de rotação, torque e potência para diferentes amostras combustíveis em diferentes cargas. Comparando-se as amostras com e sem dissolução por H_2 notou-se que quando avaliadas as curvas de rotação com base em diferentes cargas, todas as amostras com adição de H_2 apresentaram valores de rotação maiores em todas as faixas de carga em relação as que não passaram por dissolução por H_2 . Esse desempenho somente não ocorreu para a amostra de diesel S10, cujo valor obtido foi estatisticamente igual ao encontrado para a amostra diesel S10/ H_2 em todas as faixas de carga analisadas. O melhor desempenho encontrado foi com a amostra de B20/ H_2 (3324 rpm na faixa de carga de 70 %), e a maior influência da adição de H_2 foi na amostra B100, pois nas maiores cargas impostas (60 % e 70 %), a amostra B100/ H_2 obteve melhor desempenho (3529 rpm e 3264 rpm respectivamente) que o B100 sem adição de H_2 (3235 rpm e 3043 rpm respectivamente).

Em relação ao torque/carga, comparando-se as amostras com e sem dissolução por H_2 , pode-se inferir que houve uma influência para este teste da adição de gás hidrogênio, pois todas as amostras, nas mesmas condições, tiveram torque melhor, exceto para a amostra B40 (11,4 N.m), pois a mesma quando submetida à carga de 70 % obteve um alcance de valor maior que a amostra B40/ H_2 (11,05 N.m). Apesar da amostra B40 ter apresentado um valor de torque maior, considera-se estatisticamente igual ao encontrado por B40/ H_2 . A amostra que obteve um maior torque dentre todas as amostras (com ou sem dissolução) foi a amostra de diesel S10/ H_2 (11,85 N.m), confirmando assim a influência positiva do gás hidrogênio nas amostras, pois a amostra de diesel S10 sem dissolução por gás hidrogênio foi a que obteve o menor desempenho nas mesmas condições de comparação (9,45 N.m).

Em relação à potência/carga, comparando-se as amostras sem e com dissolução por gás hidrogênio percebe-se que houve uma influência positiva da adição deste gás nas amostras combustíveis, pois, neste caso, a amostra de diesel S10 que até então havia tido um dos menores

desempenhos de potência (3,23 kW), com a adição de gás hidrogênio passou a obter o melhor desempenho dentre todas as amostras, alcançando o melhor valor de potência (4,03 kW) em alta carga (70 %).

Em relação ao segundo teste realizado, todos os gráficos das amostras estudadas para o torque/potência conforme a variação da rotação apresentaram uma inflexão próxima à 2700 rpm, a qual pode significar o torque máximo para deslocamento em uma determinada rotação. A amostra que obteve torque máximo e maior potência nesta faixa de rotação foi a B20 tanto com (2,95 N.m e 0,31 kW) e sem dissolução por H₂ (2,55 N.m e 0,27 kW). No geral, todas as amostras com adição de gás hidrogênio tiveram um maior torque e maior potência nas rotações analisadas, mostrando que a dissolução provocou uma influência positiva nas amostras.

Em altas rotações (3600 rpm), a amostra que obteve melhor desempenho foi o *blend* diesel S10/H₂ (1,75 N.m e 0,25 kW), e a amostra que obteve pior desempenho quando submetido às altas rotações foi o B80, pois o mesmo alcançou os menores valores de torque e potência nesta faixa de rotação (1,15 N.m e 0,16 kW)

Pode-se concluir que a dissolução por gás hidrogênio nos combustíveis tipo diesel/biodiesel influencia positivamente quando da realização de testes de desempenho que envolve rotação, torque e potência de motores diesel, o que dá margem para o aprofundamento de outros estudos na área de combustíveis, possibilitando uma maior compreensão do estudo apresentado.

7. ATIVIDADES FUTURAS

Sugere-se como trabalhos futuros a análise em condições diversas de desempenho de um motor de combustão interna com *blends* em diferentes proporções como as estudadas neste trabalho, e além de verificar a eficiência da utilização do gás hidrogênio nestas amostras em relação ao torque e potência do motor, seria interessante se avaliar também o consumo específico de combustível.

Além das sugestões citadas acima, é importante a promoção de meios para a realização da medição de vazão de entrada e saída do gás hidrogênio quando de sua dissolução nas amostras combustíveis, também é importante a realização de outras caracterizações; como por exemplo, a análise de capacidade calorífica das amostras preparadas. Através desta análise seria possível uma maior compreensão sobre as diferenças de desempenho em motores para as amostras com ou sem a presença do gás hidrogênio.

REFERÊNCIAS

- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil). **Dados estatísticos mensais**. Brasília-DF, 2010. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=37675&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1291049592468>>. Acesso em: 29 jul. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Resolução ANP 50/2013**. 2013. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 19/01/2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Resolução ANP 45/2014**. 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 19/01/2018.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015**. Rio de Janeiro: ANP, 2016.
- ALAGUMALAI, A. Internal combustion engines: Progress and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.38, p. 561–571, 2014.
- ALDHAIHAWI, M., CHIRIAC, R., BĂDESCU, V., DESCOMBES, G., & PODEVIN, P. Investigation on the mixture formation, combustion characteristics and performance of a Diesel engine fueled with Diesel, Biodiesel B20 and hydrogen addition. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 26, p. 16793-16807, 2017.
- AN, H.; YANG, W. M.; MAGHBOULI, A.; LI, J.; CHOU, S. K.; CHUA, K. J.; WANG, J.X.; LI, L. Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of a hydrogen assisted biodiesel combustion in a diesel engine. **Fuel**, v. 120, p. 186-194, 2014.
- BALTACIOGLU, M. K.; ARAT, H. T.; ÖZCANLI, M.; AYDIN, K. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 19, p. 8347-8353, 2016.
- BAMBRILA, J. A. Estudo Experimental e Simulação Termodinâmica de Desempenho em um Motor de Combustão Interna Operando com Óleo Diesel e Etanol. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil, 2006.
- BARABAS, I.; TODORUT, A.; BĂLDEAN, D. Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends. **Fuel**. Vol. 89, n. 12, p. 3827-3832, 2010.
- BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; VOLPATO, C.E.S. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de Biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set/out., 2008.
- BARRETO, L.; MAKIHIRA, A.; RIAHI, K. The hydrogen economy in the 21st century a sustainable development scenario. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.28, p.267–84, 2003.
- BATMAZ, I. The impact of using hydrogen as fuel on engine performance and exhaust emissions in diesel engines. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 35, n. 6, p. 556-563, 2013.

BEATRIZ, A.; ARAÚJO Y. J. K.; LIMA, D. P. Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas. **Química Nova**, 34, 306-319, 2011.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25ª ed. São Paulo: E. Blucher. 2005. 1232 p.

BRASIL. **Lei nº. 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Dispõe sobre a introdução do Biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm>. Acesso em: 21/01/2018;

BRASIL. **Lei nº. 13.033, de 24 de setembro de 2014**. Dispõe sobre a adição obrigatória de Biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 8.723, de 28 de outubro de 1993; revoga dispositivos da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Lei/L13033.htm>. Acesso em: 16/01/2018;

BRASIL. **Lei nº. 13.263, de 23 de março de 2016**. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de Biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13263.htm#art1>. Acesso em: 15/01/2018;

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. **Boletim mensal dos combustíveis renováveis – julho 2016**. Brasília, Edição Nº101, 26 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveisrenovaveis/publicacoes/boletim-mensal-de-combustiveis-renovaveis>>. Acesso em: 21/01/2018.

BRASIL. **Lei nº 13.576**, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2017; Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm>. Acesso em: 11/01/2018.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. Pearson Educación, 2008.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo, SP: Blucher, 2012. v. 1. 553 p.

BUCKEL, J.W.; CHANDRA, S. Hot wire ignition of hydrogen-oxygen mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.21, p.39-44, 1996.

CARVALHO, A. L., SANTANA, S. M., SILVA, C. S., PEPE, I. M., BEZERRA, M. A., ARAGÃO, L. M., & TEIXEIRA, L. S. Evaluation of the oxidative stability of biodiesel blends from soybean, tallow and castor bean using experimental mixture design. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 8, p. 1373-1379, 2013.

CASTELLANELLI, M.; SOUZA, S. N. M.; SILVA, S. L.; KAILER, E.K. Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.145-153, 2008.

CHIRIAC R.; APOSTOLESCU, N. Emissions of a diesel engine using B20 and effects of hydrogen addition. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.38, n. 30, p. 13453-13462, 2013.

CHINTALA, V.; SUBRAMANIAN, K. A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 70, p. 472-491, 2017.

CHOLLET, H.M. **Curso Prático e Profissional para Mecânicos de Automóveis**. São Paulo, Brasil: Editora HEMUS, p.404, 1981.

CHRISTODOULOU, F.; MEGARITIS, A. Experimental investigation of the effects of separate hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 24, p. 10126-10140, 2013.

CORACH, J., SORICHETTI, P. A., & ROMANO, S. D. Permittivity of biodiesel-rich blends with fossil diesel fuel: application to biodiesel content estimation. **Fuel**, v. 177, p. 268-273, 2016.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v.20, p.532-537, 2000.

DABDOUB, M.J.; BRONZEL, J. L.; RAMPIN, M. A. Biodiesel: Visão Crítica do Status Atual e Perspectivas na Academia e na Indústria. **Química Nova**, v. 32, n.3, p. 776-792, 2009.

DE ALMEIDA BARBOSA, Luiz Claudio. **Espectroscopia no infravermelho: na caracterização de compostos orgânicos**. Ed. UFV, 2007.

DE SOUZA, E. F. M., PETERNELLI, L. A., & DE MELLO, M. P. (2014). Software Livre R: aplicação estatística.

DELGADO, F.; EVANGELISTA, M.; ROITMAN, T. **Biocombustíveis**, Rio de Janeiro, 2017.

Dinamômetro para motor a combustão interna- Modelo XL43. Ibatiba, São Paulo, 2014. 44p.

EIT. Engineering Institute of Technology of Australia. **A Few (Brief) Examples of Virtual Labs**. Disponível em:<<http://www.eit.edu.au/virtuallaboratories>>. Acesso em: 07/02/2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Versão para Consulta Pública. 2017c.

GELBARD, G.; BRÈS, O.; VARGAS, R. M.; VIELFAURE, F.; SCHUCHARDT, U. F. H. Nuclear Magnetic Resonance Determination of the Yield of the Transesterification of Rapeseed Oil with Methanol. **Journal of the American Oil Chemists Society**, 72: 1239–1241, 1995.

GESTEIRA, L. G. G. K. **Sistema de aquisição de dados baseado em LabVIEW para um dinamômetro de chassi**. Dissertação de mestrado- Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. 2014.

GIRARDI, J. C., BARICATTI, R. A., SANTOS, R. F., AMARAL, C. Z., HAUPENTHAL, S. W. H. W., & SIQUEIRA, J. A. C. Análise de blendas de biodiesel como alternativas para

melhora do ponto de entupimento de filtro a frio (PEFF). **Acta Iguazu**, v. 6, n. 5, p. 271-279, 2017.

GUARIEIRO, L. L. N., PINTO, A. C., AGUIAR, P. F. D., RIBEIRO, N. M. Metodologia analítica para quantificar o teor de biodiesel na mistura biodiesel: diesel utilizando espectroscopia na região do infravermelho. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, p. 421-426, 2008.

GUEDES, A. D. M. **Estudo Experimental sobre o Impacto do Etanol em Misturas Diesel-Biodiesel-Etanol nos Motores de Ignição por Compressão**. 2017. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

GUIMARÃES, C. C., SANTOS, V. M. L., DANTAS, A. C. S., CORTEZ, J. W., PEREIRA, P. J. Gains in performance of diesel cycle engine using b10 compared to other mixtures. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 2, p. 124-132, 2018.

HARAGOPALA, B.; SHRIVASTAVA, K. N.; BHAKTA, H. N. Hydrogen for dual fuel engine operation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.8, p. 381-4, 1983.

HEYWOOD, John. **Internal combustion engine fundamentals**. United States of America: McGraw-Hill. 1988.

HOLANDA, A. **Biodiesel e inclusão social**. Câmara dos Deputados, coordenação de publicações, Brasília, p.200. Série caderno de altos estudos, n.1, 2004.

ILERI, E.; KOCAR, G. Experimental investigation of the effect of antioxidant additives on NOx emissions of a diesel engine using biodiesel. **Fuel**, 2014; 125:44e9.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial (Brasil). **Mapeamento tecnológico do biodiesel e tecnologias correlatas sob o enfoque dos pedidos de patentes**, 2008. Disponível em:<<http://www.Inpi.gov.br>>. Acesso em :15/12/2017.

KANAVELI, I. P.; ATZEMI, M.; & LOIS, E. Predicting the viscosity of diesel/biodiesel blends. **Fuel**, v. 199, p. 248-263, 2017.

KHALID, A.; JAAT, M.; MUSTAFFA, N., ANUAR, M. D.; MANSHOOR, B.; ALI, M. F. M.; NGALI, Z. Effects of Biodiesel on Performance and Emissions Characteristics in Diesel Engine. **Applied Mechanics and Materials**, n. 663, p. 39-43, 2014.

KICH, F. M., **Bancada dinamométrica para a medição de rendimento de sistemas de transmissão mecânica**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011.

KNOTHE, G.; VAN-GERPEN, J.; PEREIRA, L.; KRAHL, J. **Manual de biodiesel**. Curitiba: EdgardBlücher, 2006. 340p.

KOLLOSS, A. **Construção de dinamômetro para medição de torque e potência de MCI de pequeno porte**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Automotiva). Joinville, Santa Catarina, 2016.

KÖSE, H.; CINIVIZ, M. An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen. **Fuel processing technology**, v. 114, p. 26-34, 2013.

LAHANE, S.; SUBRAMANIAN, K. A. Effect of different percentages of biodiesel–diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. **Fuel**, v. 139, p.537-545, 2015.

LAPUERTA, M.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, D.; & PATIÑO-CAMINO, R. Modeling viscosity of butanol and ethanol blends with diesel and biodiesel fuels. **Fuel**, v. 199, p. 332-338, 2017.

LEVY, A. The accuracy of the bubble meter method for gas flow measurements. **Journal of Scientific Instruments**, v. 41, n. 7, p. 449, 1964.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. da. Biodiesel: Parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Publindústria, Porto, Portugal, 2006.

MARTYR, A.J.; PLINT, M. A. **Engine Testing Theory and Practice**, 3º edição. Butterworth Heinemann, USA. 2007.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas: ensaio e certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários "Luiz de Queiroz", cap. 8, p.385-462, 1996.

MILAZZO, M. F.; SPINA, F.; CAVALLARO, S.; BART, J. C. J. Sustainable soy biodiesel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 806-852. 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Boletim dos Biocombustíveis**.109.ed. 2017.

MOFIJUR, M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; RASUL, M. G.; ATABANI, A. E.; HAZRAT, M. A., MAHMUDUL, H. M. “Effect of Biodiesel-diesel Blending on Physico-chemical Properties of Biodiesel Produced from Moringa Oleifera”. **Procedia Engineering**, v. 105, p. 665-669, 2015.

MOMIRLAN, M.; VEZIROGLU, T. Current status of hydrogen energy. **Renewable and Sustainable**, v. 6, n. 1-2, p. 141–179, 2002.

MORSY, M. H.; EL-LEATHY, A. M.; HEPBASLI, A. An experimental study on the performance and emission assessment of a hydrogen/diesel fueled engine. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 37, n. 3, p. 254-264, 2015.

MOURA, B. S. **Transesterificação Alcalina de Óleos Vegetais Para Produção de Biodiesel: Avaliação Técnica e Econômica**. Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

NAINWAL, S.; SHARMA, N.; SHARMA, A. S.; JAIN, S.; & Jain, S. Cold flow properties improvement of Jatropha curcas biodiesel and waste cooking oil biodiesel using winterization and blending. **Energy**, v. 89, p. 702-707, 2015.

NEVES, M.C.T. **Desempenho operacional e opacidade da fumaça do trator agrícola em função do tipo de biodiesel (soja x murumuru) em operação de preparo do solo.** 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2012.

NUNES, P. G. K. **Simulação termodinâmica para motores diesel.** 218f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

OSAKI, M.; BATALHA, M. O. Produção de Biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio. In: **Congresso Da Sociedade Brasileira De Economia E Sociologia Rural**, 2008, Rio Branco. Anais...Rio Branco: SOBER, 2008. Disponível em: <www.sober.org.br/palestra/9/171.pdf>. Acesso em: 19/11/2017.

PARENTE, E. J. S. **BIODIESEL: Uma aventura tecnológica num país engraçado.** Fortaleza, Ceará, 2003. Disponível em:<<http://www.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2008/01430.pdf>>. Acessado em: 21/04/2016.

PINTO, A. C.; GUARIEIRO, L. L. N.; REZENDE, M. J. C.; RIBEIRO, N. M.; TORRES, E. A.; LOPES, W. A.; PEREIRA, P. A. P.; ANDRADE, J. B. Biodiesel: An Overview. **Journal of de Brazilian Chemical Society**, vol. 16, n. 6B, p. 1313-1330, 2005.

PODORODECZKI, P. R. Análise de desempenho de motor diesel com injeção eletrônica Common Rail alimentado com misturas diesel-biodiesel em dinamômetro de chassi. Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais, 2016.

POUSA, G. P. A. G.; SANTOS, A. L. F.; SUAREZ, P. A. Z. History and policy of biodiesel in Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 11, p. 5393-5398, 2007.

RAHDE, S. B. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA. Centro de Tecnologia. **Motores de Combustão Interna.** Notas de aula. 2002. 14 p.

RASLAVICIUS, L.; BAZARAS, Z. Variations in oxygenated blend composition to meet energy and combustion characteristics very similar to the diesel fuel. **Fuel Process Technol.**, 2010;91:1049–54.

RESOLUÇÃO nº 11, DE 14 DE DEZEMBRO DE 2016. Dispõe sobre adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional.

ROCHA, G. D. **Determinação do teor de biodiesel no petrodiesel através da RMN em baixo campo, aliada a calibração multivariada.** 2013. 112p. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

ROCHA, H. M. Z.; PEREIRA, R. S.; NOGUEIRA, M. F. M.; BELCHIOR, C. R. P.; TOSTES, M. L. E. Experimental investigation of hydrogen addition in the intake air of compressed ignition engines running on biodiesel blend. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 7, p. 4530-4539, 2017.

ROMANO, S. D.; SORICHETTI, P. A. Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization. **Green Energy and Technology**, DOI: 10.1007/978-1-84996-519-4_2, Springer-Verlag London Limited, 2011.

ROSA, J. S. **Estudo de um motor ciclo diesel monocilíndrico bi-combustível**. 104f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2014.

SALIBA, M. A.; LINARDI, M. **Hidrogênio Nuclear – Possibilidades para o Brasil**. Centro de células a combustível e hidrogênio, instituto de Pesquisa e Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) São Paulo, 2009.

SANTOS, F. M. S. M. dos. O combustível “Hidrogênio”. **Educação, Ciência e Tecnologia**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Superior Politécnico de Viseu. Disponível em <<http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf>>. Acesso em 28 out.2017.

SANTOS, G. L (2010) Óleo refinado de soja para acionamento de motores diesel. **Engenharia na Agricultura**, 18:288-296.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source. **Applied Energy**, v. 87. p. 2218 – 2229, 2010.

SARAVANAN, N.; NAGARAJAN, G.; DHANASEKARAN, C.; KALAISELVAN, K.M. Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine. Int. **J. Hydrogen Energy**, 2007; 32:4071 e 80.

SEIFFERT, U.W.; BRAESS, H.H. **Handbook of Automotive Engineering**. SAE International. Warrendale: PA, 2005.

SERRANO, L. M. V.; CÂMARA, R. M. O.; CARREIRA, V. J. R.; SILVA, M. C. G. da. Performance study about Biodiesel impact on buses engines using dynamometer tests and fleet consumption data. **Energy Conversion and Management**. Vol. 60, p.2–9, 2012.

SHAHIR, S. A., MASJUKI, H. H., KALAM, M. A., IMRAN, A., FATTAH, I. R., SANJID, A. Feasibility of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compability, safety and combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.32, p. 379-395. 2014.

SHARMA, A.; & MURUGAN, S. Effect of blending waste tyre derived fuel on oxidation stability of biodiesel and performance and emission studies of a diesel engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 118, p. 365-374, 2017.

SILVA, F. D. L. E. **Avaliação do desempenho, desgaste e emissões de motores diesel operando com biodiesel puro (b100)**. 2013. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pará, Belém, PR.

SILVA, M. J. D., DE SOUZA, S. N., SOUZA, A. A., MARTINS, G. I., SECCO, D. Motor gerador ciclo diesel sob cinco proporções de biodiesel com óleo diesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2012.

SOUSA, L. G. D. **Âodos tridimensionais com elevado tempo de vida útil para a produção eletroquímica de ozônio a partir da eletrólise da água pura**. 2017. 172p. Tese (Doutorado-Programa de Pós-graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG.

SOUZA, M. M. V. M. **Tecnologia do hidrogênio**. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro. Editora Synergia. Rio de Janeiro. 2009.

STONE, R. **Introduction to internal combustion engines**. 6. ed. United States of America: SAE, 1999. 574p.

SUBHASH, L.; SUBRAMANIAN, K. Effect of different percentages of biodiesel-diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. **Fuel**, 2015; 139:537 e 45.

SUNDUS, F.; FAZAL, M. A.; MASJUKI, H. H. Tribology with biodiesel: A study on enhancing biodiesel stability and its fuel properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 399-412, 2017.

TAPANES, N. C., ARANDA, D. A. G., PEREZ, R. S., CRUZ, Y. R. Biodiesel no Brasil: matérias primas e tecnologias de produção. **Acta Sci Tech**, v. 1, n. 1, p. 119-125, 2013.

TEIXEIRA, C.V. **Análise de emissões e desempenho de motores diesel utilizando óleo diesel comercial, biodiesel de palma (B100) e misturas (BX)**. 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

TINPRABATH, P.; HESPEL, C.; CHANCHAONA, S.; & FOUCHER, F. Influence of biodiesel and diesel fuel blends on the injection rate under cold conditions. **Fuel**, v. 144, p. 80-89, 2015.

TZIOURTZIOUMIS, D.; STAMATELOS, A. Effects of a 70% Biodiesel blend on the fuel injection system operation during steady-state and transient performance of a common rail diesel engine. **Energy Conversion and Management**. Vol.60, p.56 -67.2012.

VANZELA, E.; NADALETI, W. C.; BARICCATTI, R. A.; CREMONEZ, P. A.; ROSSI, E.; BELLI, P.; SOUZA, S. N. “Physicochemical properties of ethanol with the addition of biodiesel for use in Otto cycle internal combustion engines: Results and revision”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 74, 1181–1188, 2017.

VOLPATO, C. E. S.; CONDE, A. P.; BARBOSA, J. A.; SALVADOR, J. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125-1130, 2009.

WILLARD, W. P. Engineering fundamentals of the internal combustion engine. **New Jersey. Hal**, v. 229, 2004.

WOO, C.; KOOK, S.; HAWKES, E. R.; ROGERS, P. L.; & MARQUIS, C. Dependency of engine combustion on blending ratio variations of lipase-catalysed coconut oil biodiesel and petroleum diesel. **Fuel**, v. 169, p. 146-157, 2016.

WU, S.; YASSINE, M. H.; SUIDAN, M. T.; & VENOSA, A. D. Anaerobic biodegradation of soybean biodiesel and diesel blends under sulfate-reducing conditions. **Chemosphere**, v. 161, p. 382-389, 2016.